

<http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech>

ISSN: 1686-9869 (Print), ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๕

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๕

VOLUME 18 | ISSUE 3 | 2022 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายิ่งจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรรัตน์ ผลศิลป์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี นายสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการนานาชาติ

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis
Professor Dr.Cristina Leonelli
Professor Dr.Greg Heness
Professor Dr.Michiya Matsusaki
Professor Dr.Kannan Venkatramanan

University of Birmingham, United Kingdom
University of Modena and Reggio Emilia, Italy
University of Technology Sydney, Australia
Osaka University, Japan
SCSVMV University, India

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

Professor Dr.Ing.Suchart Siengchin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Associate Professor Dr.Smith Songpiriyakij	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Editor-in-Chief

Associate Professor Dr.Attaphon Kaewvilai	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Associate Editor

Associate Professor Dr.Boonlue Sawatmongkhon	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
--	---

Editorial Board Members

Professor Dr.Prayoot Akkaraekthalin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Sutthisak Phongthanapanich	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Navadol Laosiripojan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pichet Limsuwan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Sumrerng Jugjai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pranut Potiyaraj	Chulalongkorn University
Professor Dr.Hathaikarn Manuspiya	Chulalongkorn University
Professor Dr.Phadungsak Ratanadecho	Thammasat University
Professor Dr.Prinya Chindapasirt	Khon Kaen University
Professor Wing Commander Dr.Sarawut Sujitjorn	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Thanatchai Kulworawanichpong	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Apirat Laobuthee	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Sureerat Polsilapa	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Duangrudee Chaysuwan	Kasetsart University

International Editors

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis	University of Birmingham, United Kingdom
Professor Dr.Cristina Leonelli	University of Modena and Reggio Emilia, Italy
Professor Dr.Greg Heness	University of Technology Sydney, Australia
Professor Dr.Michiya Matsusaki	Osaka University, Japan
Professor Dr.Kannan Venkatramanan	SCSVMV University, India

Head of Administrative Management

Associate Professor Dr.Kampanart Theinnoi	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Administrative Management

Assistant Professor Dr.Prasertsak Tiawongsombat	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assistant Professor Dr.Pantip Boonsong	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Journal Manager

Miss Chonlada Chueapradit	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---------------------------	---

วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเป็นวารสารตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่องค์ความรู้ งานวิจัย สิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม ของภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม โดยบทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมพลังงานและพลังงานทดแทน วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และแบบจำลอง เป็นต้น

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิทางสาขาที่เกี่ยวข้องไม่น้อยกว่า 3 ท่าน ซึ่งผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความ ขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมีกำหนดการออกปีละ 3 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนกันยายน – ธันวาคม ของทุกปี

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 02-555-2000 ต่อ 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

The journal of industrial technology is an academic publication which devotes to be a medium to disseminate knowledge, research, invention, and innovation for academics. The article provides and reports of interest to the field of engineering technology such as mechanical engineering, civil engineering, electrical and electronic engineering, chemical engineering, materials engineering, production engineering, industrial engineering, environmental engineering, energy and renewable energy engineering, computational engineering and etc.

For publication, the submitted articles will be reviewed through a preliminary assessment process for the quality and scope of the content, duplication, and plagiarism by the editorial board and then evaluated for an academic quality for an academic quality by at least 3 experts in related fields. The authors and reviewers do not know each other's information (double-blinded peer reviews). The high quality-reviewed manuscript will be considered to be accepted for publication. For the last step, the editorial board will verify and proofread the articles before online publishing and printing out all in the journal for further publication.

In addition, the research and academic works published in this journal are considered as the independent opinions of the author. The author is responsible for any legal consequences that may result from the published articles which editorial members not always necessary to agree.

Publishing Schedule

The journal of industrial technology is published in 3 issues per year. Issue 1 will be published between January and April of every year. Issue 2 will be published between May and August of every year. Issue 3 will be published between September and December of every year.

Publisher

Research and Academic Supports Division College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Building 63, 3rd Floor, 1518, Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800, Tel. +66 2 555-2000 ext. 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Print: 1686-9869, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 18 ฉบับที่ 3 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่า วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาและเผยแพร่บทความด้วยระบบ Online Journal Submission (OJS) ร่วมกับการเผยแพร่บทความแบบรูปเล่ม ทั้งนี้ วารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัล (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ให้กับทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงนำเข้าสู่ข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) ฐานข้อมูล Asian Citation Index (ACI) และฐานข้อมูล Google Scholar ซึ่งทำให้การสืบค้นและการอ้างอิงข้อมูลบทความและข้อมูลของผู้นิพนธ์ด้วยระบบออนไลน์นั้นถูกต้องสมบูรณ์และรวดเร็วยิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้จัดพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี คือฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เดือนเมษายน ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม และฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม สำหรับการเผยแพร่บทความแบบออนไลน์นั้นได้ดำเนินการผ่านทางเว็บไซต์ ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech และ ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal ที่อยู่ในระบบ Thai Journals Online (ThaiJO)

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชาขอเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ ขอกราบขอบพระคุณที่ปรึกษาวารสารฯ กองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ ที่สละเวลาและใช้ความรู้ความสามารถในการทำให้คุณภาพของวารสารฯ เป็นที่น่าเชื่อถือและมีคุณค่าเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ และขอขอบคุณนักวิชาการทุกท่านที่ส่งบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเข้าร่วมทำให้วารสารฯ ดำเนินการสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ พร้อมทั้งรับฟังข้อเสนอแนะจากทุกภาคส่วนเพื่อทำให้วารสารฯ มีการพัฒนามากยิ่งขึ้น และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลต่อไป

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
การวิเคราะห์และทดสอบดินเลนจากบ่อดักตะกอนของเหมืองแม่เมาะเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ป้อชโซลาน (Analysis and Testing of Muddy Soil from the Sediment Pond of The Mae Moh Mine for Portland Pozzolan Cement Production) <i>Sucheewan Inthung, Pirat Jaroonpattanapong, Anucha Wannagon</i>	1-14
Influences of Aging and Inflation Pressure on Stiffness and Absorbed Energy of a Passenger Car Radial Tire <i>Supasit Nantapuk, Sathaporn Chuepeng, Manida Tongroon</i>	15-28
การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซในการออกแบบและพัฒนา ผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก (Application of Quality Function Development Technique in Combination with Kansei Engineering in the Design and Development of Ceramic Tea Set Products) <i>Surasit Rawangwong, Chatree Homkhiew, Thaya Pirom, Julaluk Rodjananugoon, Chaiwattanapat Laosat</i>	29-46
ระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร (Centimeter Indoor Real-Time Location System) <i>Hathairat ketmaneechairat, Banatus Soiraya</i>	47-68
การเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนในการเพาะปลูกหน่อไม้ฝรั่งด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Increasing Yield and Reducing the Cost of Cultivation of Asparagus with the Internet of Things) <i>Siriwich Tadsuan, Panuwat Taerakul</i>	69-88



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การเปรียบเทียบวิธีการประมาณเวลากิจกรรมในเทคนิคการประเมินค่าและควบคุมโครงการ (A Comparison of Activity Time Estimates Methods in PERT) <i>Nanthawat Maha, Kanlaya Boonlha</i>	89-102
การพัฒนาเตาฟืนประสิทธิภาพสูงบนพื้นฐานการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CFD (High-efficiency Wood Stove Development Based on CFD Analysis) <i>Rachan Vongtavee, Thaithat Sudsuansee</i>	103-118
ผลกระทบของการปรับตั้งจังหวะการฉีดน้ำมันไฟโรไลซิสจากพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลที่มีต่อ สมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษขอเครื่องยนต์ดีเซล (Effects of Injection Timing Adjustment of Plastic Pyrolysis Oil Blended with and Diesel Fuel on Performance and Emissions of Diesel Engine) <i>Chonlakarn Wongkhorsub, Anucha Krutthaphan, Kampanart Theinnoi, Seekharin Komolhirun, Soontorn Odngam, Mongkol Dansuuntornchai</i>	119-129
การลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาและแก้ไขมุมเอียงของหัวอ่านสำหรับการบันทึกเชิงแม่เหล็ก แบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย (Reducing the Complexity of the Skew Angle Detector and Corrector for Bit-Patterned Magnetic Recording) <i>Santi Koonkarnkhai, Piya Kovintavewat</i>	130-145
การติดตามคุณภาพน้ำผิวดินของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (Monitoring of Surface Water Quality at Ubon Ratchathani University) <i>Khanidta Bootdee, Arunya Wetchasan, Intira Inlerd, Sithichai Chaikhan, Nukul Mongkol</i>	146-160
การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซรุ่มกับแบบจำลองคานอเพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ โคมไฟจากกระจูดจักสาน (Application of Kansei Engineering Technique and Kano Model for Design and Development of Lamp Products from Krajoood Basketry) <i>Surasit Rawangwong, Chatree Homkhiew, Chainarong Srivabut, Pheeraphong Phanthasri</i>	161-178



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การวิเคราะห์ระบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบโดยใช้วิธีไฟไนท์ อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ (The System Analysis and Build Prototype of Flat-plate Solar Collector by 3-D Finite Element Method) <i>Issaraporn Amornsawatwattana, Suparoek Junsupasen, Alongkorn Namahoot</i>	179-194
อิทธิพลของสารเคลือบฐานชีวภาพชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติของกระดาษ (Influences of Carboxymethyl Cellulose Bio-based Coating on Paper Properties) <i>Surachai Khankaew, Chonlada Tangtet, Chalothon Hunsuwan, Kanpicha Suwannawatanamatee</i>	195-207
การประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกสำหรับการพยากรณ์ราคาพืชไร่ของ ประเทศไทย (Application of a Long Short - Term Memory Deep Natural Network Model for Field Crops Price Forecasting in Thailand) <i>Thanakon Sutthison</i>	208-227
ผลของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาดุก (<i>Clarias</i>) แปรรูป (Effect of Active Packaging on the Quality of Processed-Catfish (<i>Clarias</i>) Products) <i>Kanpicha Suwannawatanamatee, Suchada Kantaros, Surachai Khankaew</i>	228-243
การสำรวจมาตรฐานความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ: กรณีศึกษาจุดตัดทางรถไฟในจังหวัด ฉะเชิงเทรา (Survey of Safety Standards at Railway Intersections: A Case Study of Railway Intersections in Chachoengsao Province) <i>Jatuphon Pisitsak, Methae Promsila, Tanatat Monmongkol, Kingkarn Kittisuntaropas</i>	244-259
ผลกระทบของปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดของวัสดุเชิงประกอบโดยการออกแบบ การทดลองแบบไอ-ออปติมอล (Effect of Factors and Optimal Condition in Milling Process of Composites Using I-Optimal Experimental Design) <i>Chainarong Srivabut, Chatree Homkhiew, Surasit Rawangwong</i>	260-279



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ	S4

การวิเคราะห์และทดสอบดินเลนจากบ่อดักตะกอนของเหมืองแม่เมาะเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

สุชีวัน อินทุง^{1*} ไพรัช จุญญพัฒน์พงศ์² และ อนุชา วรรณก้อน³

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

² ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sucheewan_nab@cmru.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มีนาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 15 สิงหาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 29 สิงหาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ: ดินเลนในบ่อดักตะกอนของเหมืองแม่เมาะถูกนำมาทดสอบและผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจากการวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า ดินเลนมีแร่เคโอลิไนต์เป็นส่วนประกอบ เมื่อทดลองเผาตัวอย่างดินเลนที่อุณหภูมิในช่วง 700-900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำดินเลนเผามาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก แล้วบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างจากกระบวนการพบเฟสของสารปอซโซลานในรูปของ Tobermorite ($\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และ Foshagite ($\text{Ca}_4(\text{Si}_3\text{O}_9)(\text{OH})_2$) หรือโครงสร้าง (CSH) จากนั้นนำดินเลนเผาที่ 100 และ 700-900 °C ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา โดยผสมดินเลนเผาร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และทรายละเอียดในสัดส่วนตามมาตรฐานการขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์ในแบบพิมพ์ทองเหลืองขนาด 5 x 5 x 5 ซม. จากนั้นบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอซโซลานตามมาตรฐาน มอก.849 พบว่า ตัวอย่างที่มีการผสมดินเลนเผาในช่วง 700-900 °C ผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีกำลังอัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน ตัวอย่างที่ผ่านการเผา 800 °C ผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักบ่ม 28 วัน มีกำลังอัดที่สูงที่สุด จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

คำสำคัญ: ดินเลน; ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน; กำลังรับแรงอัด

Analysis and Testing of Muddy Soil from the Sediment Pond of The Mae Moh Mine for Portland Pozzolan Cement Production

Suchewan Inthung^{1*}, Pirat Jaroopattanapong² and Anucha Wannagon³

¹ Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

² Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

³ National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency

*Corresponding author, E-mail: suchewan_nab@cmru.ac.th

Received: 16 March 2022; Revised: 15 August 2022; Accepted: 29 August 2022

Online Published: 15 November 2022

Abstract: The clayed soil from the sediment-trapping sump of the Mae Moh mine was examined to produce Portland pozzolan cement. The X-ray diffraction (XRD) analysis showed that the clayed soil consisted of kaolinite. After heat-treated at temperatures in the range of 700-900 °C for 3 h, the clayed soil samples were mixed with ordinary Portland cement at the ratio of 0, 10 and 20 wt.%, and then cured in lime water for 3, 7 and 28 days, respectively. XRD results of the cement samples from the process revealed pozzolanic phases as Tobermorite ($\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) and Foshagite ($\text{Ca}_4(\text{Si}_3\text{O}_9)(\text{OH})_2$) or CSH structure. Consequently, the 100 and 700-900 °C of heat-treated clayed soils were mixed with ordinary Portland cement and sand to form the mortar in the proportions of 0, 10 and 20 wt.% according to the mortar forming standard. The mortar sample was formed in a brass mold of size 5 x 5 x 5 cm., then cured in lime water for 3, 7 and 28 days respectively. The properties of the samples were tested according to the TIS 849 standard. The results showed that the samples with 10 wt.% of 700 - 900 °C heat-treated clayed soils achieved compressive strength according to standard. The samples with 10 wt.% of 800 °C heat-treated clayed soil after being cured for 28 days have maximum compressive strength. This study shows the potential of clayed soil from the sediment-trapping sump of the Mae Moh mine for use in Portland pozzolan cement production.

Keywords: Clayed soil; Portland pozzolan cement; compressive strength



1. บทนำ

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุผสมที่ประกอบไปด้วยซิลิกา อลูมินา หรือซิลิกาและอลูมินา ที่มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย [1] แต่เมื่ออบจนเป็นผงละเอียดและมีความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติแล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตซึ่งมีสมบัติยึดประสานได้ [2] และมักจะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ แต่ต้องใช้ปริมาณของสารปอซโซลานในปริมาณจำกัด [3] ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน และปูนไฮดรอลิกจะก่อตัวและแข็งตัวขึ้นได้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือเมื่ออยู่ในน้ำ [3] วัสดุปอซโซลานมี 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุธรรมชาติ เช่น แร่ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ท ถ้ำภูเขาไฟ ดินขาวซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการบด และเผาเพื่อนำไปใช้ และวัสดุปอซโซลานอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุที่ได้จากกระบวนการผลิต เช่น ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าเป็นต้น [1] ดินขาวเป็นดินที่มีซิลิกา และอลูมินาที่อยู่ในรูปของ แร่เคโอลิไนต์สูง เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 800 °C จะทำให้แร่เคโอลิไนต์เปลี่ยนเป็นเมตะกาไลน์ซึ่งอยู่ในรูปของอสัณฐาน และเมื่อเมตะกาไลน์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนกับน้ำ จะเกิดเป็นสารปอซโซลาน เรียกนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งผลของปฏิกิริยาอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติช่วยเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต [4]

ตัวอย่างดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะนั้นมีแร่เคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างถึงแม้จะไม่ใช่แร่ที่มีปริมาณมากที่สุดก็ตาม แต่เมื่อทดลองนำดินเลนไปเผาที่อุณหภูมิ 500 - 900 °C [4] พบว่าแร่เคโอลิไนต์ในดินเลนได้กลายเป็นเมตะกาไลน์ ตามผลการวิเคราะห์เฟสของตัวอย่างด้วย XRD [2] ทำให้ผู้วิจัยเห็นความเป็นไปได้ที่จะนำเอาดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะซึ่งมีปริมาณมากครอบคลุมพื้นที่ถึง 42,890 ตร.ม. และมีความลึกถึง 15 เมตร (ข้อมูลจาก กฟผ. ปี 2563) และกำลังจะสิ้นบ่อมาทดลองผลิตเป็นสารปอซโซลาน เพื่อที่สามารถนำมาผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานเพื่อที่สามารถนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ที่มีต้นทุนการผลิตสูง และสร้างมลพิษ (CO_2) ให้กับสิ่งแวดล้อม ถ้าทำได้ก็จะทำให้ดินเลนที่เหลือทิ้งเหล่านี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างสูงสุด ที่ผ่านมามีการสังเคราะห์วัสดุปอซโซลานจากหลายแหล่งเพื่อผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างเช่น คอนกรีต [5] อิฐบล็อกประสานที่ผลิตจากดินตะกอนน้ำประปา [6] และตัวดูดซับโลหะหนัก [7] และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารปอซโซลานประเภทเมตะกาไลน์เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 [5, 8]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

นำตัวอย่างดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะมาแยกสิ่งเจือปนออก ล้างด้วยน้ำ บั่นน้ำดินในถังบั่น ร้อนผ่านตะแกรง 325 เมช. จากนั้น นำดินเลนไปอบแห้งที่ 100 °C มาเผาที่ 500 - 900 °C เป็นเวลา 3 ชม. และวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงแร่ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance



นำดินเลนที่อบแห้งและเผาที่อุณหภูมิ 700-900 °C ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในอัตราส่วนดินเลนเผาร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และบ่มในน้ำปูนใสเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก [9] เป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นด้วย XRD

นำดินเลนเผาอุณหภูมิที่ 700-900 °C ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในอัตราส่วนดินเลนร้อยละ 0, 10 และ 20 และทรายละเอียดตามมาตรฐานในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายร้อยละ 1 : 2.75 [10] โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นมอร์ต้าร์ในแบบพิมพ์ทองเหลืองขนาดกว้าง 5 ซม. ยาว 5 ซม. ลึก 5 ซม. [11] และบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วันจากนั้นทดสอบหาค่ากำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดแบบทำลาย (Uniaxial Compressive Test รุ่น Model Controls S.P.A 50-C 46L2) ทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำ การหดและขยายตัว และการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5910LV

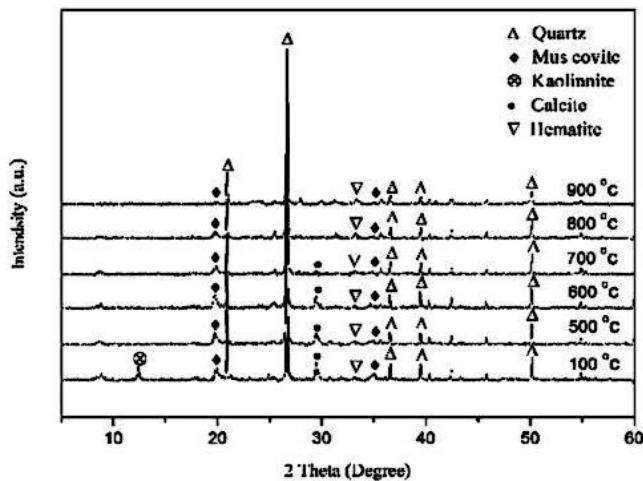
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ดินเลน

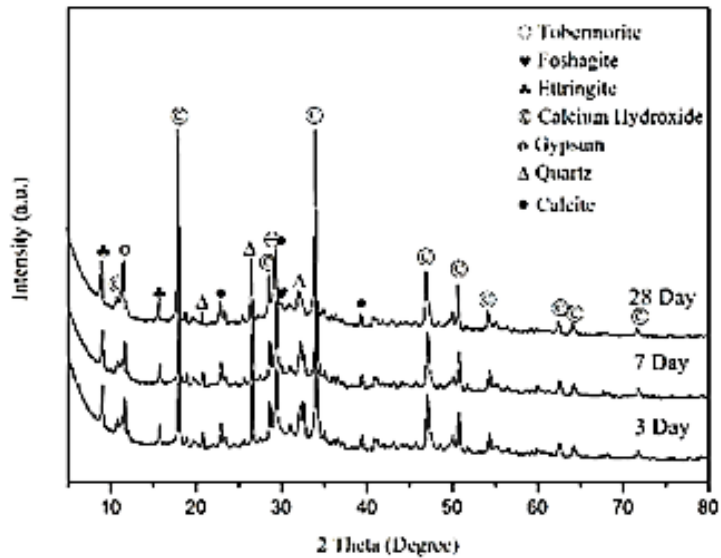
ผลการวิเคราะห์ XRD ตัวอย่างดินเลนอบที่ 100 °C พบแร่ควอตซ์ มัสโคไวต์ แร่เคโอลิไนต์ แร่แคลไซต์ และเฮมาไทต์ ผล XRD ดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 500-900 °C พบแร่ควอตซ์ มัสโคไวต์และแร่เฮมาไทต์ ตามที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่า ตัวอย่างดินเลนที่เผาอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 500-900 °C ไม่พบแร่เคโอลิไนต์ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเมตะเกอลิน [4]

3.2 ผลการวิเคราะห์เฟส

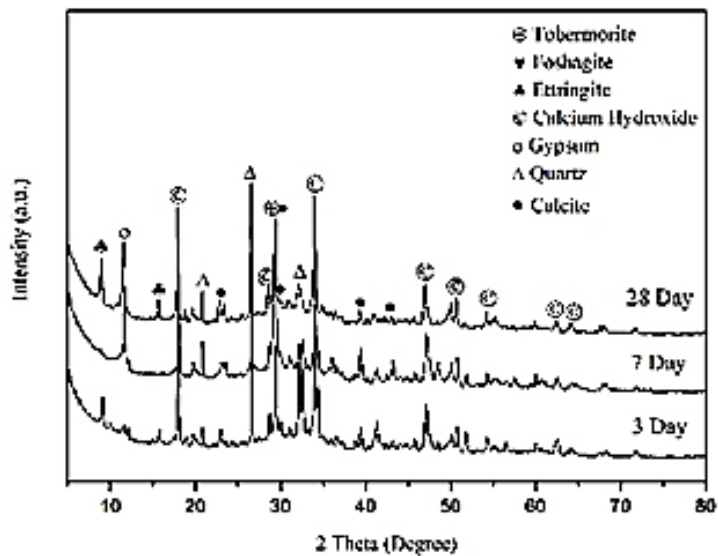
ผลการวิเคราะห์เฟสของสารปอซโซลานในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานเฟส 700-900 °C บ่ม 3,7 และ 28 วัน ในอัตราส่วนผสมดินเลนเผา ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ด้วย XRD พบ เฟส Tobermorite ($\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และ Foshagite ($\text{Ca}_4(\text{Si}_3\text{O}_9)(\text{OH})_2$) เป็นโครงสร้างแบบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นเฟสหนึ่งของสารปอซโซลาน [12] ตามกราฟที่แสดงในรูปที่ 2, 3 และ 4



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100, 500 – 900 °C

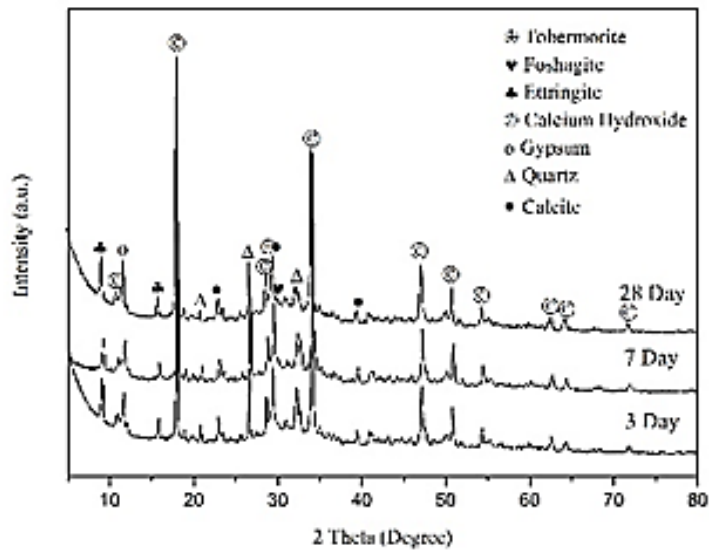


(ก)

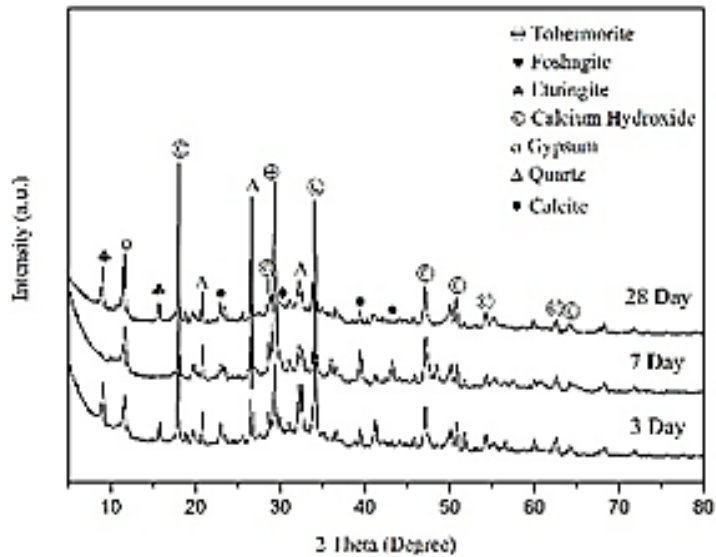


(ข)

รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมดินเลนเผา 700 °C (ก) อัตราส่วนร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก บ่ม 3,7 และ 28 วัน

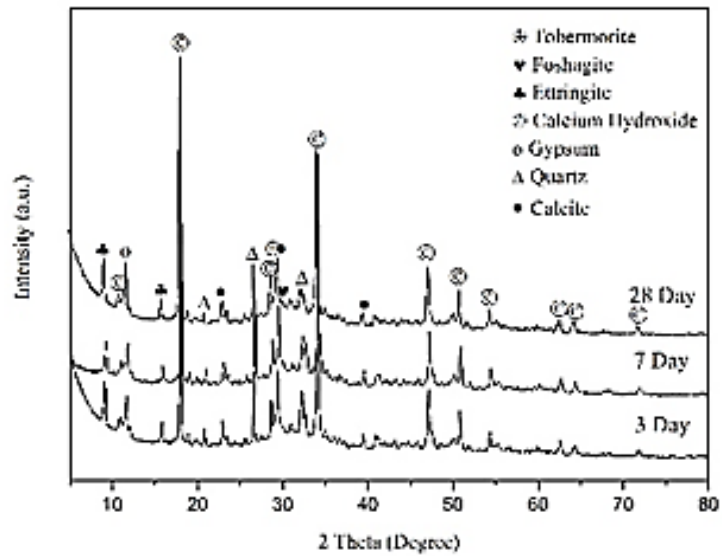


(ก)

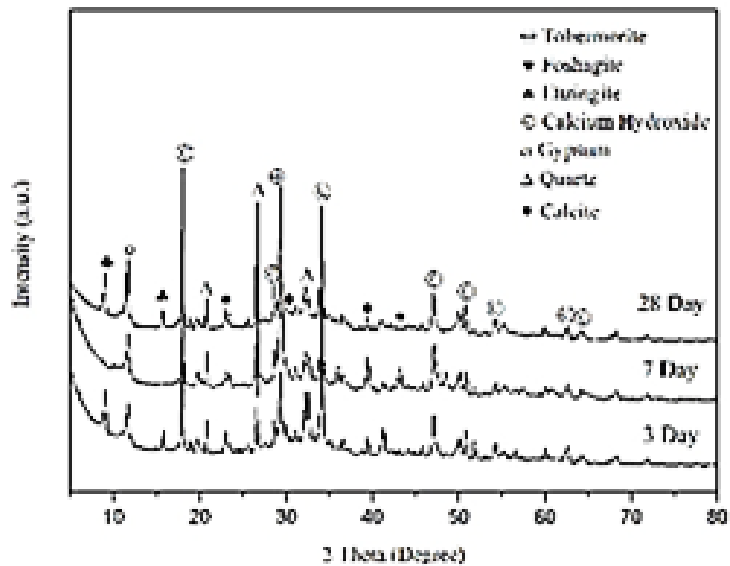


(ข)

รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมดินเลนเผา 800 °C (ก) อัตราส่วนร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ป่ม 3,7 และ 28 วัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมดินเลนเผา 900 °C (ก) อัตราส่วนร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 บ่ม 3,7 และ 28 วัน



3.3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานที่ผสมดินเลนเผา ที่อุณหภูมิที่ 700-900 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิที่ 700-900 °C ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานกำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐาน (มอก.849-2556) คือไม่ต่ำกว่า 13, 20 และ 25 MPa เมื่อบ่ม 3,7 และ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 5

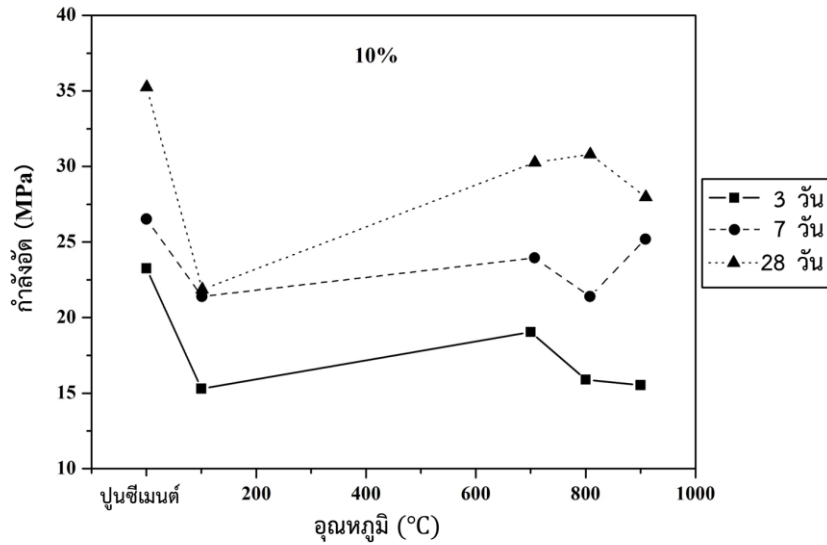
ค่ากำลังอัดที่สูงคือ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิที่ 800 °C ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก บ่ม 28 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30.68 MPa ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาที่ว่า เเคลอินต์จะเปลี่ยนเป็นเมตะเกาลินได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 800 °C [4] แต่เมื่อเพิ่มดินเลนเผาเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ไม่มีตัวอย่างใดที่มีค่าความต้านทานกำลังอัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน ถึงแม้ว่ากำลังอัดในช่วง 3 วันแรกจะมีค่าเกินมาตรฐานก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยที่ว่า สารปอชโซลานประเภทเมตะเกาลินนั้นจะทำให้กำลังอัดของปูนซีเมนต์ในช่วงแรกดีก็ตาม [8] ดังแสดงในตารางที่ 2 และ รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดของดินเลนเผาเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานคือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 กำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 0,10 โดยน้ำหนัก

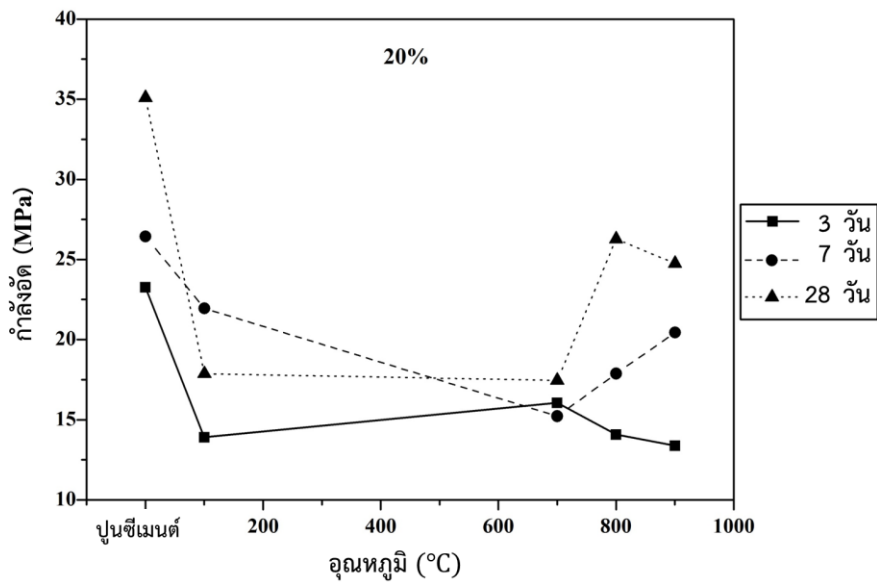
ตัวอย่างผสมดิน เลนเผาที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	กำลังอัด (MPa)		
	บ่ม 3 (วัน)	บ่ม 7 (วัน)	บ่ม 28 (วัน)
มอก.849-2562 (IP)	13	20	25
100	15.29	21.00	21.79
700	19.04	23.88	30.14
800	15.89	21.34	30.68
900	15.53	25.11	27.86

ตารางที่ 2 กำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 0,20 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างผสมดิน เลนเผาที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	กำลังอัด (MPa)		
	บ่ม 3 (วัน)	บ่ม 7 (วัน)	บ่ม 28 (วัน)
มอก.849-2562 (IP)	13	20	25
100	13.91	21.95	17.87
700	16.06	15.22	17.46
800	14.07	17.88	26.28
900	13.38	20.44	24.76



รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700–900 °C ร้อยละ 0,10 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700–900 °C ผสมร้อยละ 0,20 โดยน้ำหนัก



3.4 ผลการทดสอบค่าการหดและการขยายตัว

ผลการทดสอบค่าการหดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 700-900 °C บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ในอัตราส่วนผสมดินเลนเผาร้อยละ 10 และ 20 พบว่ามีค่าการหดและการขยายตัวในช่วงแคบ ๆ ระหว่าง -0.34 (หดตัว) ถึง +2.07 (ขยายตัว) ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

3.5 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 °C และ 700-900 °C บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ผสมดินเลนเผาร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมดินเลนเผา 800 และ 900 °C มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาบ่มนานขึ้น ตรงข้ามกับตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100°C ที่มีแนวโน้มลดลง ที่ดังตารางที่ 5 และ 6

3.6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากำลังอัด กับค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 10

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากำลังอัด กับค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอซโซลานสำหรับตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักซึ่งให้กำลังอัดสูงที่สุดพบว่า เมื่อเวลาบ่มมากขึ้นทำให้ กำลังอัดเพิ่มขึ้น จาก 15.89 เป็น 21.34 และ 30.68 MPa เมื่อบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่ การดูดซึมน้ำก็มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 10.30 เป็น 10.73 และ 10.87 เมื่อบ่ม บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับเช่นกัน

จากแนวโน้มของกราฟจะเห็นว่า ทั้งอัตราการดูดซึมน้ำและกำลังอัดจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างสูงในช่วงแรก แต่จะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อบ่มนานขึ้น โดยเฉพาะค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่ลดลงเมื่อบ่ม 28 วัน ตามที่แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ของโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่บ่ม 28 วัน ที่จะเห็นโครงสร้างที่ค่อนข้างเป็นแผ่นที่บวมและมีรูพรุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่ม 3 และ 7 วัน ตามที่แสดงในรูปที่ 8 และ 9

ตารางที่ 3 ร้อยละการหดและขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 10

ตัวอย่างที่ผสม ดินเลนเผา 10%	ร้อยละการขยายตัว		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
100 °C	6.25	6.88	5.29
700 °C	-1.85	0.27	0.27
800 °C	2.81	1.82	1.82
900 °C	-0.67	0.66	0.66

ตารางที่ 4 ร้อยละการหดและขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 20

ตัวอย่างที่ผสม ดินเลนเผา 20%	ร้อยละการขยายตัว		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
100 °C	6.25	6.88	5.29
700 °C	-0.34	0.28	1.13
800 °C	0.80	1.82	1.86
900 °C	0.86	1.86	2.07

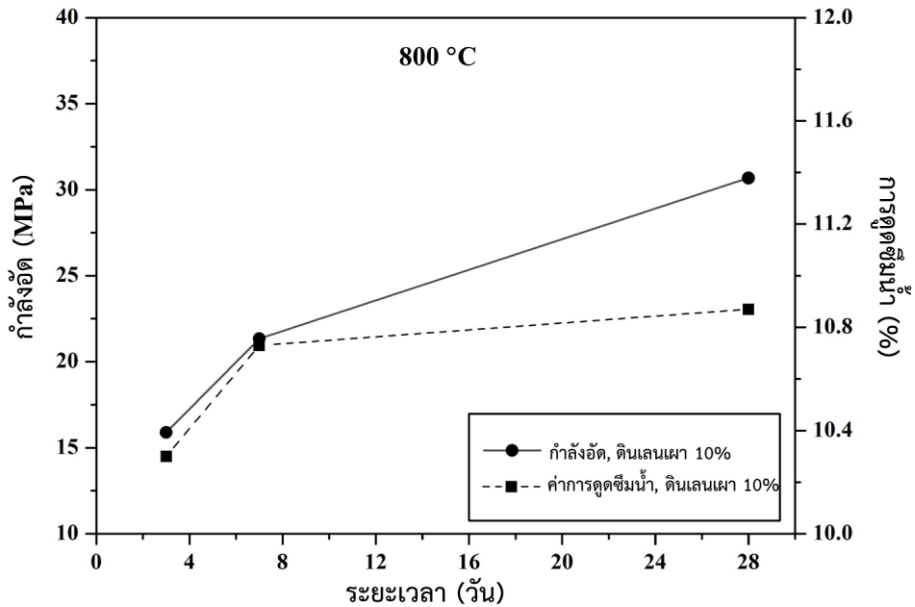


ตารางที่ 5 ร้อยละการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 10

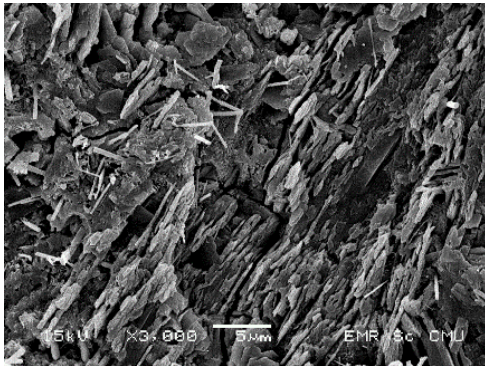
ตัวอย่างที่ผสม	ร้อยละการดูดซึมน้ำ		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
ดินเลนเผา 10%			
100 °C	11.29	10.57	9.21
700 °C	10.25	10.87	9.92
800 °C	10.30	10.73	10.87
900 °C	10.10	10.48	11.00

ตารางที่ 6 ร้อยละการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700 - 900 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

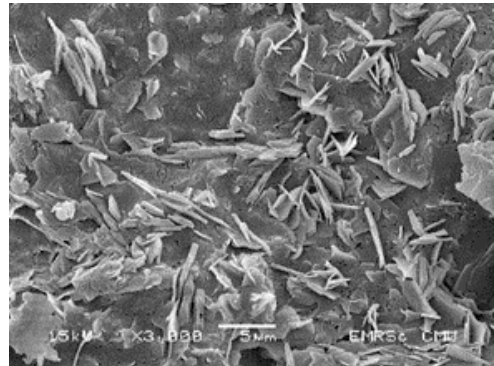
ตัวอย่างที่ผสม	ร้อยละการดูดซึมน้ำ		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
ดินเลนเผา 20%			
100 °C	11.71	10.58	9.21
700 °C	10.56	9.3	11.57
800 °C	10.89	10.60	11.71
900 °C	10.58	11.69	11.52



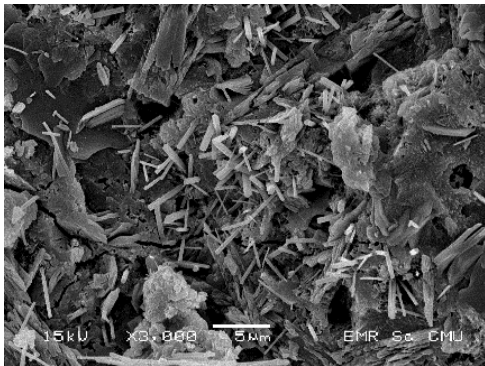
รูปที่ 7 กราฟกำลังอัด และการดูดซึมน้ำของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



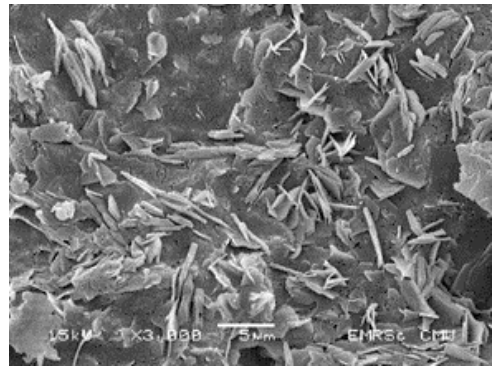
3 วัน



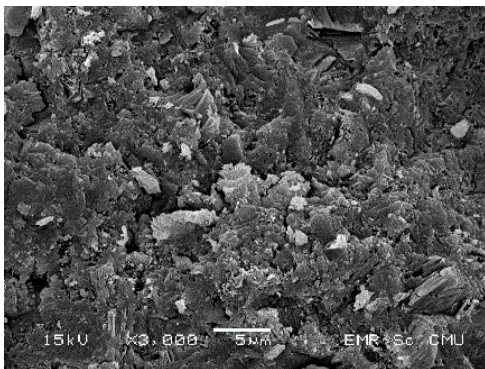
3 วัน



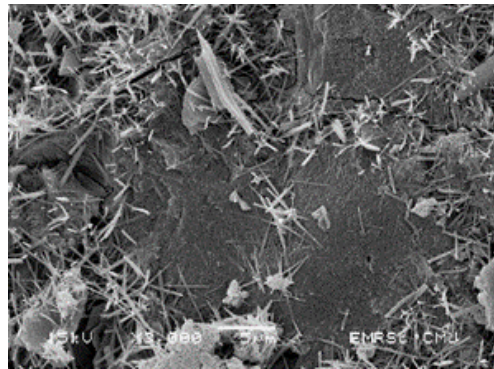
7 วัน



7 วัน



28 วัน



28 วัน

รูปที่ 8 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาบ่ม 3 7 และ 28 วัน

รูปที่ 9 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 °C อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ซึ่งให้กำลังอัดสูงสุด 30.68 MPa



3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา กับตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผา 800 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 10 บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ซึ่งให้กำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างที่ทดลองทั้งหมด ในตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเมื่อบ่ม 3 วัน มีลักษณะที่เป็นแผ่นผลึกหนาซ้อนกัน เมื่อบ่ม 7 วัน จะเห็นแท่งเอททริงไคต์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อบ่ม 28 วัน จะเกิดเป็นแผ่นหนาทึบขึ้นแต่ในขณะที่ตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผา 800 °C ผสมดินเลนเผา ร้อยละ 10 จะสังเกตเห็นการบ่ม 3 และ 7 วันแรกนั้นจะเห็นแท่งเอททริงไคต์น้อยมากและเพิ่มมากขึ้นเมื่อบ่ม 28 วัน และเริ่มจะเห็นโครงสร้างที่เป็นแผ่นที่บวม และพบมีรูพรุนที่มากกว่า ด้วยโครงสร้างแบบนี้จะส่งผลต่อค่าของกำลังอัดที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

4. บทสรุป

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบทั้งหมดพบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 700–900 °C มีกำลังอัดที่เป็นไปตาม มอก.849-2556 และมีค่าการดูดซึมน้ำ และการขยายตัวต่ำ แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำดินเลนจากบ่อตักตะกอนในเหมืองแม่เมาะที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700-900 °C ผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยเฉพาะตัวอย่างดินเลนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ซึ่งให้กำลังอัดสูงสุดในการวิจัยนี้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เหมืองแม่เมาะที่สนับสนุนทุนวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ใช้ ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pompasit, Pozzolan, Department of Science Service, 2002, Review Article, 1-2.
- [2] H. Yanguatin, J. Tobón and J. Ramírez, Pozzolan reactivity of kaolin clays, a review, Revista Ingenieria de Construction, 2017, 32(2), 13-24.
- [3] TIS 849-2556, Portland Pozzolan Cement, 2013. (inThai)
- [4] J. Sangsuwan and P. Yoddamrong, Mechanical properties of pozzolans material lightweight concrete by binary blend system, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thesis, Thailand, 2017. (inThai)
- [5] J.A. Becerra-Duitama and D. Rojas-Avellaneda, Pozzolans: A review, Journal of Engineering and Applied Science Research, 2022, 49(4) 495-504.



- [6] A. Leeanansaksiri, W. Phochan and T. Pongnum, Development of interlocking lightweight cement block from sludge ash mixed pozzolan material, *Engineering Journal of Research and Development*, 2020, 31(1), 135-143.
- [7] P. Satiman, P. Punrattanasin, S. Pattanapairoj and T. Kongsomboon, Behavior of adsorption and desorption of heavy metals on bentonite clay mixed with cement and pozzolanic materials by column leaching test, *Engineering Journal of Research and Development*, 2020, 31(2), 57-59.
- [8] A. Shukla, N. Gupta, A. Gupta, R. Goel and S. Kumar, Natural pozzolans a comparative study: A review, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 804, 012040.
- [9] T. Cheewaket, N. Tonglom, A. Tessoongnren and W. Chalee, Effect of calcium hydroxide solution on compressive strength of mortar using high volume fly ash as a binder, *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2021, 31(2), 278-287. (inThai)
- [10] TIS 15 (12)-2525, *Portland Cement*, 1982. (inThai)
- [11] ASTM C109/C109M-02, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, 2020.
- [12] S. Boonjaeng, *Pozzolanic reaction and geopolymerization reaction of various kinds of clays and combustion ashes*, Thesis, Chiang Mai University, Thailand, 2016.

Influences of Aging and Inflation Pressure on Stiffness and Absorbed Energy of a Passenger Car Radial Tire

Supasit Nantapuk, Sathaporn Chuepeng and Manida Tongroon*

ATAE Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: manida@eng.src.ku.ac.th

Received: 6 October 2022; Revised: 12 July 2022; Accepted: 26 July 2022

Online Published: 14 December 2022

Abstract: The objective of this study is to investigate the influences of aging and inflation pressure on the stiffness and absorbed energy of radial tires. By quasi-static compression test, new and 50,000-km used tires were determined for acting force and corresponding displacement. Between the 172.4 kPa and 241.3 kPa inflation pressure range for the new tire, the load was linearly increased with displacement. The absorbed energy was non-linear increasing with the displacement. The trend of the accumulative absorbed energy was increased when inflated the tire pressure. For both new and used tires, the stiffness and the absorbed energy were linearly increasing with the inflation pressure. The used tire was harder than the new tire observed by the higher tire stiffness and can be absorbed greater energy. At the rated inflation pressure of 220.6 kPa, after 50,000 km usage, the tire was intensified by 2.62% in terms of stiffness and by 2.22% in terms of energy absorbed. On average, over the inflation pressure in the range of 172.4 kPa to 241.3 kPa, the stiffness and absorbed energy were by 3.22 % and 2.98 % increase for the aging tire compared to the base new tire.

Keywords: car; energy; passenger; stiffness; suspension; tire



1. Introduction

The tire is a friction material that plays a vital role in vehicle stability and performance. A driving power source requires tires to transmit a traction force onto road pavement through transmission and driveline systems [1]. Tires are the first contact between a car's chassis and road surface [2], especially during cornering under lateral force. Tires are in a suspension system of a vehicle that has to bear vehicle weight and road-generated vibration [3]. New-developed tires are, therefore, concerned with all performance aspects.

In an aspect of the suspension part, the tire has been modeled in various manners [4]. In a mass-spring-damper vibration model, the tire is usually considered as a spring and/or damper [5] with a complex nonlinear system [6]. Yu et al. (2016) [7] simulated a combined stiffness of leaf spring and tire assembly. Kim et al. (2015) [8] equipped a sensor to the tire and measured the strain that occurred. The hardware in the loop (HIL) system was simulated to study behavior. The measured strain has been founded to link with force and energy related to lose in terms of acoustic [9], especially tire texture that can generate different noise spectra [10].

During traction, longitudinal friction force performs its duty in sprint driving the vehicle [11]. In particular when cornering where a tire may deform [12], tire-road friction coefficient and tire stiffness

change depending on vehicle weight and speed [13]. This generates rolling resistance [14-15] and the roughness of the road excites the contact surface of the tire generating a vertical force perpendicular to the traction. These lateral, vertical, and longitudinal forces are combined as an input to the vehicle's mass-spring-damper system that has to be properly managed [16].

Parts of these force-derived energies can be harvested [17]. Roshani et al. (2016) [18] collected asphalt pavement road vehicle-induced stresses and transfer them into electricity through the piezoelectric disks. Later on, energy harvesting systems from dampers (shock absorbers) have been developed by Zhang et al. (2017) [19] and Zhang et al. (2018) [20]. For the tire itself, Maurya et al. (2018) [21] made an energy harvesting and strain sensing system for the autonomous vehicle. The system provides a power output of approx. 580 μ W at 16 Hz from the energy harvester mounted on a section of a tire that can power 78 LEDs. From these scenarios, tire stiffness plays an important role in the effects of other resultant outcomes and is also affected by other parameters concerned.

Stiffness in every part of the tire and directions that forces act on can be determined by various methods [22]. Misiewicz et al. (2016) [23] estimated the carcass stiffness of agricultural tires on hard surfaces. The tire load-deflection method was used under a variation of inflation pressure 0.5 to 2.5×10^5



Pa. The load was founded to increase with increasing deflection. Liu and Gao (2018) [24] analytically investigated nonlinear sidewall stiffness. The rigid-elastic coupled tire model was employed with heavy truck tires under impulsive loading conditions. Liu et al. (2019) [25] modeled the combined sidewall stiffness of heavy-loaded off-road tires. The sidewall radial stiffness was directly increased with increasing inflation pressure in the range of 0.3 to 0.8 MPa. Xu et al. (2022) [26] studied the structural performance of tyre walls on a full scale. A hydraulic loaded puncher with LVDT was equipped in the test machine to in determining the force and lateral displacement of the tires in a lump scale. The lateral stiffness declined during increasing lateral displacement.

While a car is in movement, tire stiffness is altered to some certain extent. Xu and Ahmadian (2013) [27] improved stiffness and damping suspension systems on tire load transfer during cornering. A nonlinear variable stiffness tire model was simulated whereas normal (vertical) and braking (longitudinal) forces were determined depending on time and conditional excitation applied. In the meantime, Soltani et al. (2015) [28] optimized tire vertical stiffness based on the ride, handling, performance, and fuel consumption criteria. The optimized tire stiffness was in the range of 100 to 300 N/mm up on certain criteria chosen. Lian et al. (2015) [29] estimated cornering stiffness

and sideslip angle by simplifying lateral dynamic models for an electric vehicle using lateral tire force data. After simplification, the front and rear cornering stiffness were reduced, to the maximum values of 80 and 30 kN/rad, respectively. Ni et al. (2017) [30] expanded tyre cornering stiffness simulation for AWD electric vehicles to analyze for static stability. Lateral and longitudinal forces were dependent on vertical load and slip ratios. During rotation, Kim (2009) [31] numerically simulated the rotational stiffness of radial tires. The rotational stiffness of the tire was directly increasing with leveling inflation pressure in the range of 50 to 300 kPa. Its behavior was explained by the macroscopic shear modulus of carcass ply and sidewall.

In aspects of the material, different constituents of tire parts cause a diverse stiffness behavior. Tao et al. (2018) [32] integrated carbon nanotubes and rubber composites as the cord. By simple swelling and infusion method, these smart cords were viable to sense interfacial strain and damage from static and cyclic loadings. By static electro-mechanical test, its stiffness was constant; the loads were linearly proportioned to the displacement in the range of 15 to 25 mm. Low-hysteresis run-flat tire was investigated by Bae et al. (2019) [33] for structural and vertical stiffnesses by considering strain energy. Vertical stiffness with linear relation to the inflation pressure of the run-flat tire was higher than that of the regular tire. Li et al. (2020) [34]



doped the Al_2O_3 - rGO network to enhance the mechanical strength of natural rubber nanocomposites. In addition, compounded tread rubber-affected winter tires were also investigated by Shenvi et al. (2022) [35].

Other independent parameters can affect tire stiffness dependent on the conditions applied. Pillai (2006) [36] Inflation pressure effect on whole tire hysteresis ratio and radial stiffness. Linear correlations between stiffness and inflation pressure were proposed. Tire-road contact stiffness was simulated by Winroth et al. (2014) [37]. The contact stiffness was nonlinear to the indentation while the contact force was linearly increasing with the indentation after 0.05 mm. Wright et al. (2019) [38] worked on SUV tire aging that was worn in certain conditions; these changed the tire stiffness and friction properties. For agricultural tires, stiffness changed as a function of tire wear was reported by Becker and Els (2022) [39].

Previously published works have used vehicle tire types as specimens of their studies, even for a variety of materials used as tire's parts. Meanwhile, limited work has been done on the stiffness change that results in the absorbed energy of radial tire. Besides, there is less available information for aging tire and inflation pressure impacted on these independent parameters. In subsequentness, some other aspects have not yet been revealed according to these matters.

The objective of this study is to investigate the influences of aging and inflation pressure on stiffness and absorbed energy of the radial tires. By quasi-static compression test, a new and 50,000-km used tires were determined for acting force and corresponding displacement. In this scheme, load and absorbed energy behavior were first explored. Dependency of tire stiffness and absorbed energy on inflation pressure will be later disclosed. Lastly, the influences of tire aging will be analyzed and discussed.

2. Materials and Method

2.1 Tire Characteristics and Composition

The experimental study was conducted using two tires with both 185/60 R15 sizes from the same manufacturer. One was a new tire and the other was a used tire (50,000 km, approx. 3 years). Both tires were newly manufactured in mid-2018 with a depth of 4.8 ± 0.06 mm averaged from eight points along both longitudinal grooves at 220.6 kPa, 35°C. The tread pattern of the test tire and nomenclature are shown in Fig. 1. There were two wide longitudinal grooves symmetrically lined in the middle of the tire. Sipe and block in the middle isle were asymmetrically inclined.

The tire cross-section and compound are shown in Fig. 2. There are four key parts: liner, bead wires, sidewall, and tread which were made of composite materials. The sidewall and the tread



were two-ply and made from polyester. The liner was a one-ply polyamide for material with two steel belts across the tire circle.

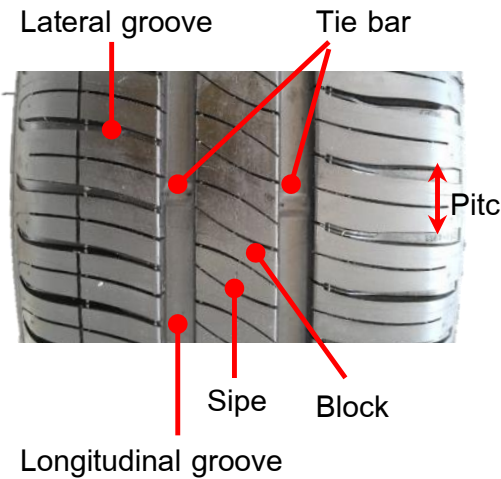


Fig. 1 Tread pattern of the test tire and nomenclature

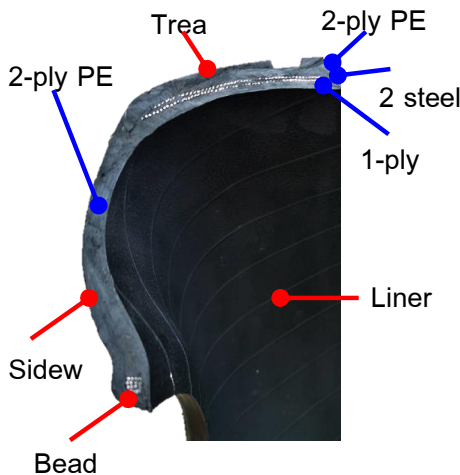


Fig. 2 Tire cross section and compound

2.2 Test Apparatus

The tires were tested by the quasi-static method using a Shimadzu Hydraulic Universal Testing Machine (Model: UH-1000kNX). The machine is a computer-controlled electro-hydraulic servo type. The force was measured by cylinder internal pressure with a high-precision pressure cell within $\pm 1.0\%$ of the indicated value (when the force is 1/1 to 1/250 of the rated value). This conforms to JIS B7721 Class 1, ISO 7500/1 Class 1, and ASTM E4 standards. Its digital force was displayed with a resolution of 1/200,000. Its stroke measurement was by the optical encoder with a digital display in 0.01 mm resolution. The quasi-static test apparatus is depicted in Fig. 3.



Fig. 3 Quasi-static test apparatus



2.3 Tire Stiffness and Absorbed Energy

Determination

The Universal Testing Machine was capable of applying force as a load to the tire correspondingly under the measurement of displacement (stroke). The slope of the corresponding force and displacement is considered the global tire stiffness. Meanwhile, the area under the force-displacement curve is the absorbed energy. By this definition, accumulative absorbed energy over displacement can be readily calculated and properly displayed throughout the paper.

2.4 Test Condition and Method

Both tires were separately placed on the test machine under specified conditions. For the load and absorbed energy behavior study, each tire was inflated for the pressure value range of 172.4 kPa (25 psi) to 241.3 kPa (35 psi) with a gradual stepping increment of 7 kPa (1 psi). This inflation pressure range was chosen according to $\pm 30\%$ of recommended pressure value defined by the manufacturer. The stroke of the machine's puncher was set to 20 mm to mimic a real-life usage of the tire. All tests were repeated three times and each average value is representative of the analysis of each condition.

3. Results and Discussion

3.1 Load and Absorbed Energy Behavior

Fig. 4 shows the characterization of load dependency on displacement within a 20-mm stroke for the new tire. The quasi-static test was in the range of inflation pressure values between 172.4 kPa and 241.3 kPa. The load was linearly dependent on displacement for all inflation pressure values. At the maximum 20-mm stroke tested, the loads were ranging from 1.57 kN to 2.03 kN in accordance with 172.4 kPa to 241.3 kPa inflation pressure values, respectively. The increasing stroke resulted in the incremental force applied. This yields positive slopes of the load-stroke characteristics (stiffness) of the new tire. However, the trend of the slope seemingly escalated during the strengthening inflation pressure. The slope value (stiffness) will be shown and discussed later in the next section.

Fig. 5 shows the accumulative absorbed energy in correspondent with displacement within 20-mm stroke for the new tire. The accumulative absorbed energy is the consequence of the force load applied to the tire by the calculation scheme described in Section 2.3. The absorbed energy was non-linear to the displacement for all inflation pressure values. The increasing number of strokes has been seen to result in exponentially increasing energy



that can be absorbed. The trend of the accumulative absorbed energy was increased when inflated the tire pressure. At the maximum 20-mm stroke tested, the maximum accumulative absorbed energy was 18.9 J at the maximum inflation pressure of 241.3 kPa.

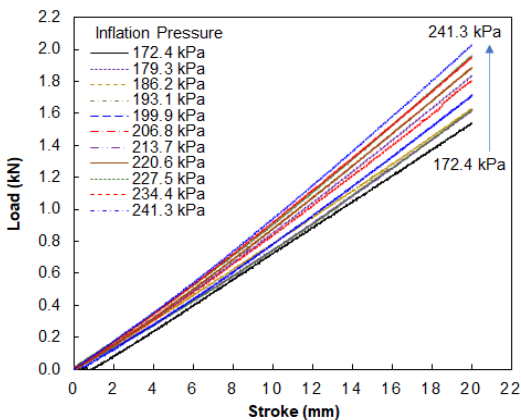


Fig. 4 Load-displacement (stroke) characteristics of the new tire

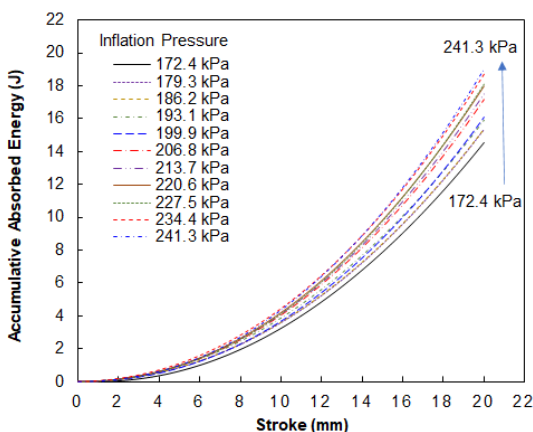


Fig. 5 Accumulative absorbed energy-displacement (stroke) characteristics of the new tire

3.2 Dependency of tire stiffness and absorbed energy on inflation pressure

After the load-stroke dependency was determined and described in the previous section, the tire stiffness can be plotted and shown in Fig. 6. The tire stiffness as calculated from the load-stroke characteristics is founded to be a linear function of the inflation pressure in the range of 172.4 kPa to 241.3 kPa. This behavior can be also observed for both new and used tires. In this range of inflation pressure, the stiffness values lie between 79.1 N/mm and 101.9 N/mm for the new tire. In the same inflation pressure range, the stiffness values were 80.3 N/mm to 102.9 N/mm for the used tire. The used tire was harder than the new tire as it displayed a higher tire stiffness. The linear regression of the tire stiffness and inflation pressure relationship was founded and can be proposed by Formula (1) and (2).

New tire:

$$\text{Stiffness (N/mm)} = 0.35 \times \text{Pressure (kPa)} + 17.292 \quad (1)$$

Used tire:

$$\text{Stiffness (N/mm)} = 0.3485 \times \text{Pressure (kPa)} + 20.457 \quad (2)$$

Fig. 7 shows the plots of accumulative absorbed energy and inflation pressure for both new and used tires. The absorbed energy as calculated from the load-stroke characteristics is also founded to be a linear function of the inflation pressure in the range of 172.4 kPa to 241.3 kPa.

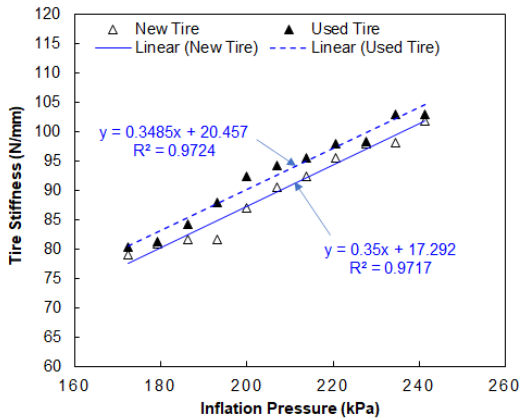


Fig. 6 Tire stiffness dependency on inflation pressure

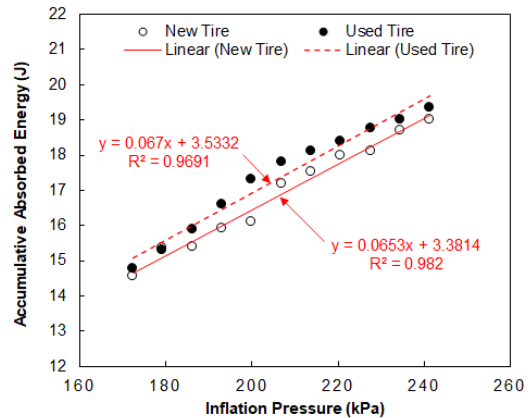


Fig. 7 Accumulative absorbed energy dependency on inflation pressure

This behavior can be also observed for both new and used tires. In this range of inflation pressure, the accumulative absorbed energies are between 14.5 J and 19.0 J for the new tire. In the same inflation pressure range, the accumulative absorbed energies were 14.8 J to 19.3 J for the used tire. The used tire which was harder can be absorbed greater energy than the new tire. The linear regression of the accumulative absorbed energy and inflation pressure relationship were founded and can be proposed by Formula (3) and (4).

New tire:

$$\text{Energy (J)} = 0.0653 \times \text{pressure (kPa)} + 3.3814 \quad (3)$$

Used tire:

$$\text{Energy (J)} = 0.0670 \times \text{pressure (kPa)} + 3.5332 \quad (4)$$

Fig. 9 explicitly shows the tire aging effects for stiffness at the rated inflation pressure of 220.6 kPa. During 50,000 km usage, the tire stiffness was intensified from 95.5 N/mm to 98.0 N/mm. This can be accounted for 2.62% in terms of stiffness. At the same rated inflation pressure of 220.6 kPa, during 50,000 km usage, the absorbed energy was strengthened from 18.0 J to 18.4 J (see Fig. 9 on the right axis). This can be accounted for 2.22% in terms of energy absorbed.

Fig. 10 shows the statistical incrementation in stiffness and absorbed energy of the used tire over the new tire. In detail, there was no trend observed for the incrementation of stiffness and absorbed energy against the inflation pressure values tested. The minimum and maximum incremental values of the used tire's stiffness and absorbed energy were 0 and 7.82%. On average, over the inflation



pressure in the range of 172.4 kPa to 241.3 kPa, the stiffness and absorbed energy were by 3.22 % and 2.98 % increase for the aging tire (50,000 km) compared to the base new tire.

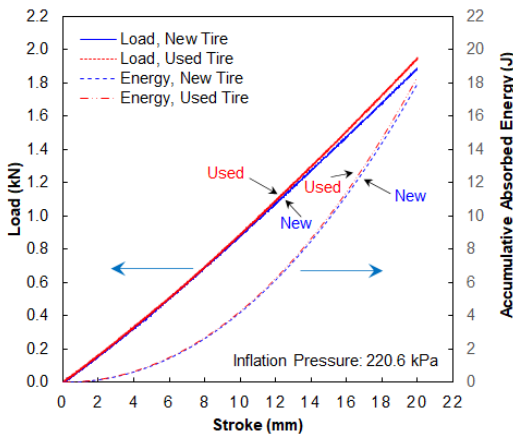


Fig. 8 Tire aging effects for load and absorbed energy characteristics, at 220.6 kPa inflation pressure

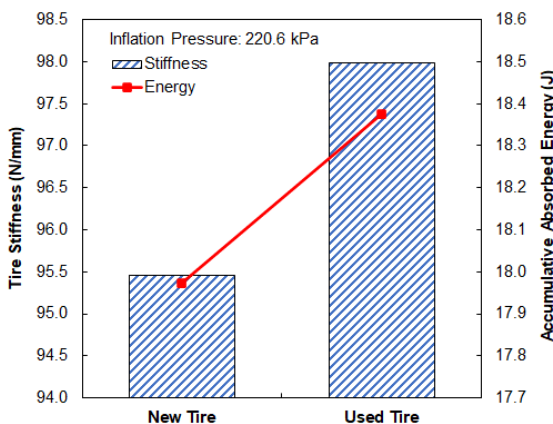


Fig. 9 Tire aging effects for stiffness and absorbed energy, at 220.6 kPa inflation pressure

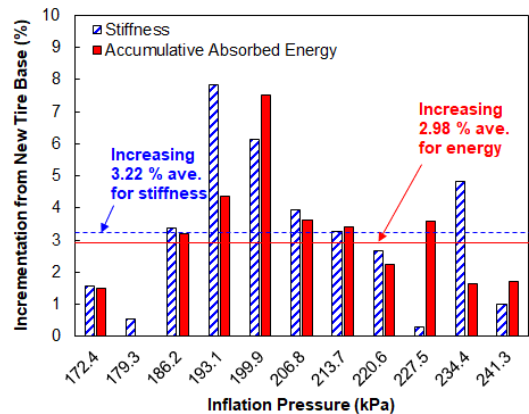


Fig. 10 Incrementation of stiffness and absorbed energy of the used and new tires

4. Conclusions

This work investigates the aging and inflation pressure effects on the stiffness and absorbed energy of radial tires. By quasi-static compression test, new and 50,000-km used tires were acted by force with corresponding displacement measurement. The conclusions can be drawn as the followings.

Between the 172.4 kPa and 241.3 kPa inflation pressure range for the new tire, the load was linearly increased with displacement up to the maximum 20-mm stroke tested. The stiffness seemingly escalated during the strengthening inflation pressure. The absorbed energy was non-linear increasing with the displacement. The trend of the accumulative absorbed energy was increased when inflated the tire pressure.

For both new and used tires, the stiffness from the load-stroke characteristics are founded to be a



linear function of the inflation pressure in the range of 172.4 kPa to 241.3 kPa. The used tire was harder than the new tire as it displayed a higher tire stiffness. The stiffness values were maximized by 101.9 N/mm and 102.9 N/mm for the new and used tires, respectively. For both new and used tires, the absorbed energy is also founded to be a linear function of the inflation pressure in the range of 172.4 kPa to 241.3 kPa. The used tire which was harder can be absorbed greater energy than the new tire. The accumulative absorbed energies were maximized by 19.0 J and 19.3 J for the new and aging tires, respectively.

The results show a higher capacity to absorb the energy for the used tire over the new tire. At the rated inflation pressure of 220.6 kPa, during 50,000 km usage, the tire was intensified by 2.62% in terms of stiffness and by 2.22% in terms of energy absorbed. On average, over the inflation pressure in the range of 172.4 kPa to 241.3 kPa, the stiffness and absorbed energy were by 3.22 % and 2.98 % increase for the used tire compared to the base new tire.

The attained results could be a guideline for tire manufacturers in terms of rubber composition and structure suitable for pressure inflation, stiffness, and aging when in use. In the aspect of car users, care should be taken when using aging tires due to changes in tire properties under certain operating conditions.

5. Acknowledgement

Kasetsart University, Faculty of Engineering at Sriracha is acknowledged for financial support to this project (Project No. 2011/64).

6. References

- [1] C. Becker and S. Els, Motion resistance measurements on large lug tyres, *Journal of Terramechanics*, 2020, 88, 17-27.
- [2] E.S. Rødland, O.C. Lind, M. Reid, L.S. Heier, E. Skogsberg, B. Snilsberg, D. Gryteselv and S. Meland, Characterization of tire and road wear microplastic particle contamination in a road tunnel: From surface to release, *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 435, 129032.
- [3] T.V. Glazkov and S.A. Reshmin, A nonlinear tire model to describe an unwanted flat vibrations of the wheels, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(16), 268-273.
- [4] Z. Liu and Q. Gao, Development of a flexible belt on an elastic multi-stiffness foundation tire model for a heavy load radial tire with a large section ratio, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 123, 43-67.
- [5] F. Braghin, F. Cheli and E. Sabbioni, Identification of tire model parameters through full vehicle experimental tests, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2011, 133(3), 031006.



- [6] H.-R.B. Bosch, H.A. Hamersma and P.S. Els, Parameterisation, validation and implementation of an all-terrain SUV FTire tyre model, *Journal of Terramechanics*, 2016, 67, 11-23.
- [7] Z. Yu, Y. Liu, B. Tinsley and A.A. Shabana, Integration of geometry and analysis for vehicle system applications: Continuum-based leaf spring and tire assembly, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2016, 11(3), 031011.
- [8] S.J. Kim, K.-S. Kim and Y.-S. Yoon, Development of a tire model based on an analysis of tire strain obtained by an intelligent tire system, *International Journal of Automotive Technology*, 2015, 16(5), 865-875.
- [9] X. Hu, X. Liu, X. Wan, Y. Shan and J. Yi, Experimental analysis of sound field in the tire cavity arising from the acoustic cavity resonance, *Applied Acoustics*, 2020, 161, 107172.
- [10] A. Del Pizzo, L. Teti, A. Moro, F. Bianco, L. Fredianelli and G. Licitra, Influence of texture on tyre road noise spectra in rubberized pavements, *Applied Acoustics*, 2020, 159, 107080.
- [11] J. Hu, S. Rakheja and Y. Zhang, Tire-road friction coefficient estimation under constant vehicle speed control, *IFAC- PapersOnLine*, 2019, 52(8), 136-141.
- [12] W. Zhao, C. Zhang and J. Zhang, Continuous measurement of tire deformation using long-gauge strain sensors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142, 106782.
- [13] R. Wang and J. Wang, Tire-road friction coefficient and tire cornering stiffness estimation based on longitudinal tire force difference generation, *Control Engineering Practice*, 2013, 21(1), 65-75.
- [14] F. Li, F. Liu, J. Liu, Y. Gao, Y. Lu, J. Chen, H. Yang and L. Zhang, Thermo-mechanical coupling analysis of transient temperature and rolling resistance for solid rubber tire: Numerical simulation and experimental verification, *Composites Science and Technology*, 2018, 167, 404-410.
- [15] Y. Gong, L. Zhao, J. Zhang and N. Hu, A novel model for determining the fatigue delamination resistance in composite laminates from a viewpoint of energy, *Composites Science and Technology*, 2018, 167, 489-496.



- [16] J. Lih, Tire damping effect on ride quality of vehicles with active control suspensions, *Journal of Vibration and Acoustics*, 2009, 131(3), 031011.
- [17] M.A.A. Abdelkareem, L. Xu, M.K.A. Ali, A. Elagouz, J. Mi, S. Guo, Y. Liu and L. Zuo, Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed Review, *Applied Energy*, 2018, 229, 672-699.
- [18] H. Roshani, S. Dessouky, A. Montoya and A.T. Papagiannakis, Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study, *Applied Energy*, 2016, 182, 210-218.
- [19] Y. Zhang, H. Chen, K. Guo, X. Zhang and S.E. Li, Electro-hydraulic damper for energy harvesting suspension: Modeling, prototyping and experimental validation, *Applied Energy*, 2017, 199, 1-12.
- [20] R. Zhang, X. Wang, E.A. Shami, S. John, L. Zuo and C.H. Wang, A novel indirect-drive regenerative shock absorber for energy harvesting and comparison with a conventional direct-drive regenerative shock absorber, *Applied Energy*, 2018, 229, 111-127.
- [21] D. Maurya, P. Kumar, S. Khaleghian, R. Sriramdas, M.G. Kang, R.A. Kishore, V. Kumar, H.-C. Songe, J.-M. Park, S. Taherif and S. Priya, Energy harvesting and strain sensing in smart tire for next generation autonomous vehicles, *Applied Energy*, 2018, 232, 312-322.
- [22] R.K. Sleeper and R.C. Dreher, Tire stiffness and damping determined from static and free-vibration tests, *NASA Technical Paper 1671*, 1980.
- [23] P.A. Misiewicz, T.E. Richards, K. Blackburn and R.J. Godwin, Comparison of methods for estimating the carcass stiffness of agricultural tyres on hard surfaces, *Biosystems Engineering*, 2016, 147, 183-192.
- [24] Z. Liu and Q. Gao, Analytical investigation on tire dynamics by rigid-elastic coupled tire model with nonlinear sidewall stiffness, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(80), 1-14.
- [25] Z. Liu, Q. Gao and H. Niu, In-plane flexible beam on elastic foundation with combined sidewall stiffness tire model for heavy-loaded off-road tire, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2019, 141(6), 061006.



- [26] Y. Xu, M. Freney, R. Hassanli, Y. Zhuge, Md.M. Rahman and Md.R. Karim, Experimental study on the structural performance of full-scale tyre wall for residential housing applications, *Engineering Structures*, 2022, 259, 114181.
- [27] Y. Xu and M. Ahmadian, Improving the capacity of tire normal force via variable stiffness and damping suspension system, *Journal of Terramechanics*, 2013, 50, 121-132.
- [28] A. Soltani, A. Goodarzi, M.H. Shojaeefard and K. Saeedi, Optimizing tire vertical stiffness based on ride, handling, performance, and fuel consumption criteria, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2015, 137(12), 121004.
- [29] Y.F. Lian, Y. Zhao, L.L. Hu and Y.T. Tian, Cornering stiffness and sideslip angle estimation based on simplified lateral dynamic models for four-in-wheel-motor-driven electric vehicles with lateral tire force information, *International Journal of Automotive Technology*, 2015, 16(4), 669-683.
- [30] J. Ni, J. Hu and C. Xiang, Relaxed static stability based on tyre cornering stiffness estimation for all-wheel-drive electric vehicle, *Control Engineering Practice*, 2017, 64, 102-110.
- [31] Y.-W. Kim, Micromechanically consistent calculation of rotational stiffness of radial tire, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23, 1294-1305.
- [32] Y. Tao, Y. Liu, H. Zhang, C.A. Stevens, E. Bilotti, T. Peijs and J.J.C. Busfielda, Smart cord-rubber composites with integrated sensing capabilities by localised carbon nanotubes using a simple swelling and infusion method, *Composites Science and Technology*, 2018, 167, 24-31.
- [33] J.-J. Bae, Y. You, J.B. Suh and N. Kang, Calculation of the structural stiffness of run-flat and regular tires by considering strain energy, *International Journal of Automotive Technology*, 2019, 20(5), 979-987.
- [34] J. Li, X. Zhao, Z. Zhang, Y. Xian, Y. Lin, X. Ji, Y. Lu and L. Zhang, Construction of interconnected Al₂O₃ doped rGO network in natural rubber nanocomposites to achieve significant thermal conductivity and mechanical strength enhancement, *Composites Science and Technology*, 2020, 186, 107930.
- [35] M.N. Shenvi, H. Mousavi and C. Sandu, Tread rubber compound effect in winter tires: Benchmarking ATIIM 2.0 with classical models, *Journal of Terramechanics*, 2022, 101, 43-58.



- [36] P.S. Pillai, Inflation pressure effect on whole tyre hysteresis ratio and radial spring constant, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2006, 13, 110-116.
- [37] J. Winroth, P.B.U. Andersson and W. Kropp, Importance of tread inertia and damping on the tyre/road contact stiffness, *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333, 5378-5385.
- [38] K.R.S. Wright, T.R. Botha and P.S. Els, Effects of age and wear on the stiffness and friction properties of an SUV tyre, *Journal of Terramechanics*, 2019, 84, 21-30.
- [39] C. Becker and S. Els, Agricultural tyre stiffness change as a function of tyre wear, *Journal of Terramechanics*, 2022, 102, 1-15.

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซ ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2*} ชาตรี หอมเขียว^{1,2} ธยาภิรมย์ จุฬาลักษณ์โรจนานุกูล¹ และ
ชัยวัฒน์ทร เลาสัตย์³

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ สาขาออกแบบ, คณะศิลปกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Surasit.r@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 กุมภาพันธ์ 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 23 มิถุนายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 10 สิงหาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิกที่สามารถตอบสนองต่อพฤติกรรม อารมณ์ และความต้องการของผู้บริโภค โดยการรวบรวมข้อมูลความต้องการของผู้บริโภคและแปลงความต้องการด้วยเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ พร้อมทั้งสำรวจข้อมูลด้านอารมณ์และความรู้สึกของผู้บริโภคด้วยการวิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทที่ 1 ในรูปแบบของสมการพหุคูณ เพื่อช่วยสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์ใหม่ ผลการวิจัยพบว่า ผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิกได้รับการออกแบบและพัฒนาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ในส่วนของรูปแบบ/รูปทรงที่มีความแปลกใหม่ มีอัตลักษณ์ท้องถิ่น มีความสวยงาม ขนาด ลวดลาย สีที่สวยงามเหมาะสม ดินมีความละเอียด ใช้งานได้หลากหลาย และมีประโยชน์ใช้สอยเหมาะสมกับการใช้งาน อีกทั้งพบว่า ค่าแสดงความรู้สึกที่ใช้ในการสื่อถึงผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย ความรู้สึกความสวยงาม แปลกใหม่ และมีความเป็นอัตลักษณ์ โดยประเด็นความต้องการที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญและมีความพึงพอใจมากที่สุดเป็นอันดับแรก คือ ประเด็นด้านการออกแบบที่มีอัตลักษณ์ท้องถิ่น โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.58 และในส่วนระดับความพึงพอใจในประเด็นรองลงมา คือ คุณลักษณะด้านผลิตภัณฑ์มีความสวยงาม โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51

คำสำคัญ: การออกแบบผลิตภัณฑ์; การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ; วิศวกรรมคั่นเซ; เซรามิก; ชุดถ้วยชา

Application of Quality Function Development Technique in Combination with Kansei Engineering in the Design and Development of Ceramic Tea Set Products

Surasit Rawangwong^{1,2*}, Chatree Homkhiew^{1,2}, Thaya Pirom¹, Julaluk Rodjananugoon¹ and Chaiwattanapat Laosat³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

³ Department of Design, Faculty of Arts, Songkhla Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: Surasit.r@rmutsv.ac.th

Received: 25 February 2022; Revised: 23 June 2022; Accepted: 10 August 2022

Online Published: 15 December 2022

Abstract: This research aims to apply the quality function development technique in combination with Kansei engineering for the design and development of ceramic tea set products that “can respond to consumer behavior, mood, and needs” By collecting consumer demand data and converting demand with a product planning matrix or the house of quality. And survey consumer sentiment data with Quantification theory type 1 in the form of a forecast equation to help create new product models. The results showed that ceramic tea set products have been designed and developed product features in terms of form/shape with novelty, local identity, beautiful, suitable size, pattern, beautiful color, the soil is fine, versatile, and useful suitable for use. Also found that the expressions used to convey a product consisted of a feeling of beauty, novelty, and identity. The issue of the needs that consumers are the most important and the most satisfied first is a design requirement with a local identity, the satisfaction level was at a very good level with an average of 4.58. And the level of satisfaction in the second issue is product features are beautiful, the satisfaction level was at a very good level with an average of 4.51.

Keywords: Product Design; Quality Function Development; Kansai Engineering; Ceramic; Tea cup set



1. บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย สามารถสร้างอาชีพสร้างรายได้สำหรับคนในท้องถิ่น อีกทั้งสามารถสร้างเศรษฐกิจของประเทศไทยได้ อุตสาหกรรมเซรามิกไทยได้ก้าวเข้าสู่ตลาดโลก โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีการนำเทคโนโลยีและการจัดการแบบใหม่ ซึ่งจะเน้นการพัฒนาด้านการกระจายสินค้า คุณภาพ รูปแบบของสินค้าให้มีความทันสมัย สอดคล้องกับความต้องการของตลาดและมีมาตรฐานการผลิตระดับสากล [1] เซรามิกจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญของประเทศไทย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เชื่อมโยงเข้ากับอุตสาหกรรมอื่น ๆ พบว่า มีโรงงานที่ได้รับอนุญาตให้ดำเนินการในอุตสาหกรรมเซรามิกกระจายอยู่ในทั่วประเทศไทย [2] นอกจากนี้ อุตสาหกรรมเซรามิกยังสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศด้วยการส่งออกที่มีมูลค่ามากถึง 330,000 ล้านบาท ซึ่งผลิตภัณฑ์เซรามิกที่สำคัญ แบ่งได้ 5 กลุ่ม ได้แก่ กระเบื้องเซรามิก เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ของชำร่วยและเครื่องประดับ และลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นต้น [3]

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลางและขนาดย่อม ในประเทศไทยมีคู่แข่งทางการค้าในแถบทวีปเอเชียโดยเฉพาะประเทศจีน สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีต้นทุนต่ำและมีคุณภาพสูง ดังนั้นผู้ประกอบการเซรามิกในประเทศไทย รวมไปถึงผู้ประกอบการพื้นที่จังหวัดสงขลา จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค เพื่อให้ผู้บริโภคมีความพึงพอใจมากที่สุด และกลับมาซื้อผลิตภัณฑ์ใหม่ในพื้นที่

สำหรับพื้นที่ภาคใต้ฝั่งชายทะเลอ่าวไทยเป็นดินแดนที่มีพัฒนาการทางประวัติศาสตร์ยาวนานมีทรัพยากรด้านการท่องเที่ยวที่หลากหลาย ทั้งธรรมชาติ ประวัติศาสตร์ ความเชื่อ วิถีชีวิตของผู้คน และกิจกรรมประเพณีต่าง ๆ โดยเฉพาะลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดสงขลา พัทลุง และนครศรีธรรมราช รวมทั้งพื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทย จากแหล่งข้อมูลวิจัย พบว่า สภาพทรัพยากรการท่องเที่ยวพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา มีจำนวนมาก โดยจัดแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติรวมถึงแหล่งมนุษย์สร้างขึ้น และแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม

จากการลงพื้นที่แหล่งท่องเที่ยวฝั่งชายทะเลอ่าวไทยของผู้ผลิตเซรามิก อำเภอเมือง อำเภอสทิงพระ อำเภอบางกล่ำ ในจังหวัดสงขลา พบว่า ผู้ผลิตมีข้อร้องเรียนด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทของฝากของที่ระลึกที่ยังขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เดิม ๆ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งยังไม่ค่อยตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคโดยเฉพาะกลุ่มนักท่องเที่ยว อีกทั้งยังไม่ค่อยแสดงเอกลักษณ์และจุดเด่นที่ชัดเจน รวมทั้งประเด็นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านการออกแบบ การขึ้นรูป การเคลือบผิว และข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกของฝากของที่ระลึกแบบเดิม ๆ ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทของใช้ ซึ่งไม่ค่อยมีการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ รวมทั้งไม่มีจุดเด่นหรือจุดขาย จากข้อมูลข้างต้นผู้ผลิตเซรามิกกรณีศึกษา ต้องการขยายกลุ่มตลาดสำหรับนักท่องเที่ยวและผู้ที่สนใจทั่วไปเพื่อรองรับการท่องเที่ยวในแถบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา รวมทั้งแถบฝั่งทะเลอ่าวไทย



รูปที่ 1 ชุดถ้วยชาแบบเดิม

จากการค้นคว้าผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) ร่วมกับเทคนิควิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering) สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่าได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องหนัง [4] การออกแบบผลิตภัณฑ์เก้าอี้สำนักงาน [5] การออกแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเป็นของที่ระลึก [6] และมีการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบเก้าอี้ [7] การออกแบบเก้าอี้รับประทานอาหาร [8] และการออกแบบปุ่มกดภายในรถยนต์ [9] จากผลงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซมาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิก ซึ่งเป็นการแปลงความต้องการของผู้บริโภคร่วมกับการแปลอารมณ์ และความรู้สึกของผู้บริโภค อีกทั้งข้อดีของเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซยังสามารถลดความผิดพลาดความต้องการที่ไม่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคช่วยในการลดระยะเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ และเพิ่มอารมณ์ ความรู้สึกที่สื่อถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ข้าวพาร์บอยล์ โดยใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ [10]

ดังนั้น จากข้อร้องเรียนของผู้บริโภคและความต้องการของผู้ผลิตเซรามิก ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์ จังหวัดสงขลา จึงเป็นที่มาของการวิจัยนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก เพื่อเป็นของฝากของที่ระลึกสำหรับนักท่องเที่ยวจังหวัดสงขลา และฝั่งทะเลอ่าวไทยที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มนักท่องเที่ยว และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มกับผู้ผลิตเซรามิก ภาควิชา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิกโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อการวิจัยครั้งนี้ คือแบบสอบถามจำนวนทั้งหมด 5 ชุด โดยแบบสอบถาม 5 ชุดดังกล่าวได้ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถามโดยการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบด้านผลิตภัณฑ์ และด้านวิศวกรรม วิธีการดำเนินงานวิจัยหลัก 5 ขั้นตอนดังนี้

2.1 การสำรวจความต้องการของผู้บริโภค

สำรวจความต้องการของผู้บริโภค เพื่อค้นหาเสียงเรียกร้องของผู้บริโภค (Voice of Customer: VOC) ด้วยวิธีการสัมภาษณ์ พูดคุย และการสำรวจด้วยแบบสอบถามที่ 1 ลักษณะคำถามปลายเปิดเกี่ยวกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก

การคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของผู้บริโภคได้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% และได้เลือกใช้สมการกรณีไม่ทราบ



จำนวนประชากรซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Sinthavalai [6] กล่าวคือ ในการคำนวณขนาดของกลุ่มตัวอย่าง พบว่า ได้มีการคำนวณจากสมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G. Cochran และเลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (1)$$

$$n = \frac{0.30(1-0.30)1.96^2}{0.05^2} = 323$$

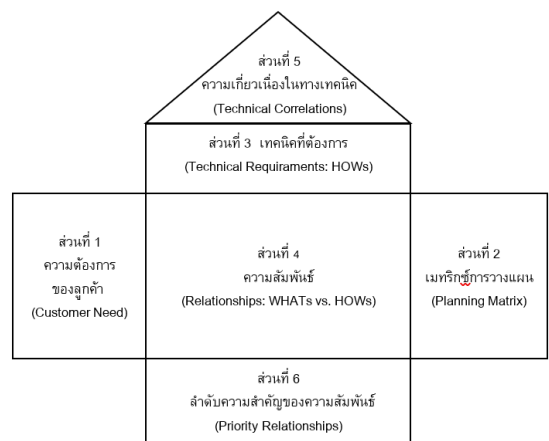
เมื่อ n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ, P คือ สัดส่วนของประชากรที่ผู้วิจัยต้องการสุ่ม (งานวิจัยนี้ กำหนดใช้ P = 0.30) ตามงานวิจัย [11], Z คือ ระดับความมั่นใจที่กำหนดหรือระดับนัยสำคัญทางสถิติ (งานวิจัยนี้ กำหนดใช้ Z = 1.96 ความเชื่อมั่น 95%), d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้น (งานวิจัยนี้ กำหนดใช้ d = 0.05 ความเชื่อมั่น 95%)

ดังนั้น ในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของผู้บริโภค พบว่ามีจำนวนขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณได้ 323 ตัวอย่าง จากนั้นจัดเรียงถ้อยคำความต้องการของลูกค้า โดยจัดกลุ่มคุณลักษณะความต้องการผลิตภัณฑ์ แล้วใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงและแผนผังต้นไม้ เพื่อช่วยจัดการวิเคราะห์ข้อมูล แล้วนำไปสร้างแบบสอบถามที่ 2 สำหรับหาระดับความสำคัญปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ และหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเพื่อใช้เป็นค่าความสำคัญในเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ

การประเมินแบบสอบถามที่ 1 และแบบสอบถามที่ 2 เป็นการสำรวจและรวบรวมความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายเป็นหลัก อีกทั้งต้องการให้ข้อมูลที่ได้รับความนิยมสอดคล้องกัน ดังนั้นผู้ตอบแบบสอบถามที่ 1 และแบบสอบถามที่ 2 จึงเป็นกลุ่มเดียวกัน คือ ผู้ผลิต กลุ่มร้านค้าผลิตภัณฑ์เซรามิกนักท่องเที่ยว และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิกในพื้นที่จังหวัดสงขลา พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง

2.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพใน ส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning) หรือบ้านคุณภาพ (House of Quality : HOQ) แสดงดังรูปที่ 2 โดยดำเนินการนำเสนอเสียงเรียกร้องของผู้บริโภค (VOC) กำหนดตัวแทนคุณลักษณะด้านคุณภาพสำหรับแสดงข้อกำหนดทางเทคนิค ดังนั้นขั้นตอนในการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งส่วนประกอบของเมทริกซ์ ดังนี้ [12-16]



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของบ้านคุณภาพ [17]



ส่วนที่ 1 การสร้างความต้องการของผู้บริโภค (Customer Needs) เป็นการนำความต้องการของผู้บริโภคที่ได้จากการสำรวจความต้องการ

ส่วนที่ 2 การสร้างเมทริกซ์การวางแผน (Planning Matrix) เป็นส่วนที่ใช้ในการประเมินหรือเปรียบเทียบความต้องการของผู้บริโภค เพื่อกำหนดอัตราการปรับปรุงในผลิตภัณฑ์

ส่วนที่ 3 การกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องการ (Technical Requirement) เป็นการระดมสมองของคณะผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเซรามิก เพื่อกำหนดความต้องการของผลิตภัณฑ์ทางด้านเทคนิคที่ตอบสนองต่อความต้องการของกลุ่มผู้บริโภค รวมทั้งกำหนดเป้าหมายทางเทคนิคและค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมายเบื้องต้น เพื่อให้ทราบถึงทิศทางการปรับปรุง โดยใช้สัญลักษณ์ค่าการเคลื่อนไหวของค่าเป้าหมาย ดังนี้ ↑ คือ ยิ่งมากยิ่งดี ○ คือ เป้าหมายเหมาะสม และ ↓ คือ ยิ่งน้อยยิ่งดี

ส่วนที่ 4 การสร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ผู้บริโภคต้องการ (ส่วนที่ 1) และความต้องการของผลิตภัณฑ์ทางด้านเทคนิค (ส่วนที่ 3) ซึ่งการทำส่วนนี้จำเป็นต้องเข้าใจถึงความสามารถของแต่ละเทคนิคต่อระดับความพึงพอใจของผู้บริโภคทั้งหมด เพื่อให้เห็นว่าตัววัดทางเทคนิคสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างไร ซึ่งในการให้ค่าคะแนนความสัมพันธ์ของความต้องการของผู้บริโภคและเทคนิคที่ต้องการส่วนใหญ่จะนิยมใช้ตัวเลข 0 คือ ไม่มีความสัมพันธ์ 1 คือ มีความสัมพันธ์น้อย

3 คือ มีความสัมพันธ์ปานกลาง และ 9 คือ มีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ

ส่วนที่ 5 ความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค (Technical Correlations) เป็นการแสดงถึงความเกี่ยวเนื่องของเทคนิคที่นำมาใช้ในตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ ซึ่งการระดมสมองร่วมกับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง โดยพิจารณาว่าเทคนิคใดที่มีความเกี่ยวข้องกันและมีความเกี่ยวข้องกันมากน้อยเพียงใด โดยใช้สัญลักษณ์ "O" หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก "X" หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และ "ช่องว่าง" หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

ส่วนที่ 6 การคำนวณหาลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ (Priority Relationships) เป็นการคำนวณหาลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์หรือส่วนที่ 4 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 2 คือ การบ่งบอกถึงความสำคัญในปริมาณต่าง ๆ เพื่อผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ทราบความต้องการและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางและคุณภาพที่ต้องได้รับการเอาใจใส่อย่างสูง โดยประกอบด้วย 2 ส่วนย่อย ๆ คือ คำนำนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ ดังสมการที่ 2 และค่านำนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ ดังสมการที่ 3

$$I = \sum(A \times B) \tag{2}$$

เมื่อ I คือค่านำนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์, A คือ ค่าความสัมพันธ์ของข้อกำหนดทางเทคนิคความต้องการของผู้บริโภค, B คือ ค่าลำดับของการให้น้ำหนักเริ่มต้น

$$IMP = \frac{1}{\sum I} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ IMP คือค่านำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคเปรียบเทียบ

จากนั้นนำข้อมูลที่มีความสำคัญที่ได้จากเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพไปดำเนินการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิกต่อไป

2.3 การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซ

การนำเทคนิควิศวกรรมคั่นเซเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเพื่อตอบสนองตรงตามความต้องการของผู้บริโภคในด้านของอารมณ์ ความรู้สึก มี 5 ขั้นตอน ดังนี้

2.3.1 การกำหนดขอบเขตการศึกษา (Choice of Domain)

ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา คือ ผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชา โดยมีขอบเขตการกำหนดกลุ่มเป้าหมายเป็นกลุ่ม ร้านค้าตัวแทนจำหน่าย นักท่องเที่ยว และกลุ่มผู้ใช้หรือตัวแทนจำหน่ายผลิตภัณฑ์เซรามิก

2.3.2 การกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก (Span the Semantic Space)

รวบรวมค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงรูปแบบของผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชา เพื่อสร้างแบบสอบถามที่ 3 โดยเน้นผู้ประเมินที่เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ และผู้เชี่ยวชาญด้านการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก จำนวน 29 ท่าน และวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence: IOC) และดำเนินการคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 เพื่อแสดงว่าข้อมูลวัดตรงกับนิยามของตัวแปร

2.3.3 การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Span the Space of Properties)

รวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อความรู้สึกผู้บริโภค เพื่อสร้างแบบสอบถามที่ 4 และประเมินแบบสอบถามโดยกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายจำนวน 150 คน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย และคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมด

2.3.4 การกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์

การรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายและแตกต่างกัน หลังจากนั้นประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงสำหรับแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ตามขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จากนั้น คัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติครอบคลุมตรงกับคุณลักษณะมากที่สุดเพื่อนำไปใช้ในแบบสอบถามถัดไป

2.3.5 การประเมินผลด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล

จากการนำข้อมูล 3 ส่วน คือ ค่าแสดงขอบเขตความรู้สึก คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดเลือกของทั้ง 3 ข้อมูล ไปสร้างแบบสอบถามที่ 5 เพื่อสังเคราะห์ผลผ่านการประเมินของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย จำนวน 58 คน ทั้งนี้ในแบบสอบถามนี้ผู้ตอบแบบสอบถามจะต้องใช้ความคิดและต้องสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อที่ตอบแบบสอบถามในแต่ละประเด็น จึงเก็บข้อมูลในจำนวนที่น้อยลง แต่อย่างไรก็ตามผู้ตอบแบบสอบถามมีความรอบคอบในใช้ความคิด วิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละประเด็นในแบบสอบถามอย่างมีคุณภาพ จากนั้นจึงทำการ



วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากคือ ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type I : QT1)

2.4 การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

หลังจากได้ผลสรุปข้อกำหนดของเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพและวิศวกรรมคั่นเซ จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้อง และส่งข้อมูลให้กับทีมงานนักออกแบบ โดยการแปลความรู้สึกที่เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์สู่องค์ประกอบด้านการออกแบบ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า และการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบในขั้นตอนต่อไป

2.5 การประเมินความพึงพอใจผลิตภัณฑ์

นำผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาต้นแบบมาสำรวจความพึงพอใจด้วยแบบสอบถามที่ 6 เพื่อสำรวจระดับคะแนนความพึงพอใจต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาต้นแบบ โดยทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลในกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายที่มีต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบจำนวน 160 ตัวอย่าง จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ย

เนื่องจากการประเมินแบบสอบถามที่ 1, 2, 4, 5 และแบบสอบถามที่ 6 เป็นการสำรวจและรวบรวมความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายเป็นหลัก อีกทั้งต้องการให้ข้อมูลด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นการประเมินแบบสอบถามของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายสำหรับแบบสอบถามที่ 4, และแบบสอบถามที่ 5 จึงเป็นกลุ่มเดียวกับแบบสอบถามที่ 1 และแบบสอบถามที่ 2 คือ ผู้ผลิต กลุ่มร้านค้าผลิตภัณฑ์

เซรามิก นักท่องเที่ยว และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิกในพื้นที่จังหวัดสงขลา พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง

3. ผลการวิจัย

ผลของการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซเพื่อทำการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชา มีผลการวิจัยดังนี้

3.1 ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ พบว่ามีรายละเอียดของผลการดำเนินงาน 6 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

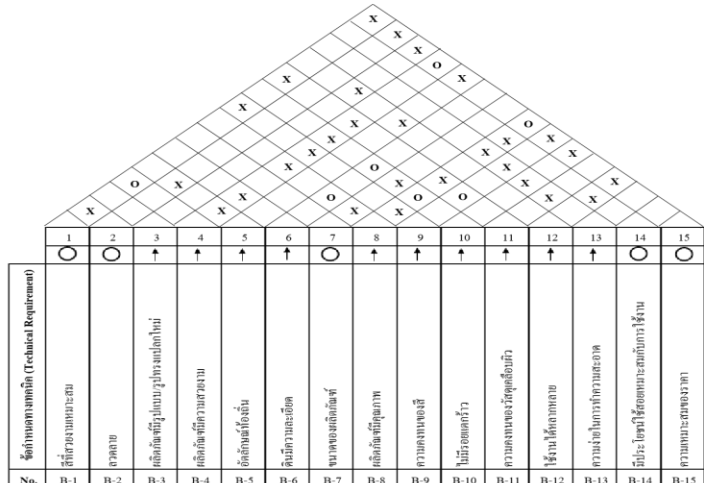
(1) ความต้องการของผู้บริโภคที่ได้จากแบบสอบถามที่ 1 จำนวน 22 ความต้องการประกอบด้วย 6 กลุ่ม คือ รูปแบบ วัสดุ อายุการใช้งาน การใช้งาน ความสะดวก และอื่น ๆ แสดงดังส่วนที่ 1 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 3

(2) คะแนนความสำคัญ พบว่า ผู้บริโภคได้ให้คะแนนความสำคัญกับปัจจัยในกลุ่มของรูปแบบด้านแสดงอัตลักษณ์ความเป็นไทยเป็นอันดับแรก โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ย 4.67 คะแนน แสดงดังส่วนที่ 2 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 3

(3) เทคนิคที่ต้องการ ผลจากการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเซรามิก พบว่า ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย 15 ข้อกำหนด แสดงดังส่วนที่ 3 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 3

สัญลักษณ์ด้านความเกี่ยวข้องในทางเทคนิค	
สัญลักษณ์	ความหมาย
○	มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก
◇	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

สัญลักษณ์ค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมาย	
สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	ยิ่งมากยิ่งดี
○	เป้าหมายเหมาะสม
↓	ยิ่งน้อยยิ่งดี



ความต้องการของลูกค้า (Customer Requirement)		No.	ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Requirement)																
		IMP	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15		
รูปลักษณ์	แสดงอัตลักษณ์ความเป็นไทย	A-1	4.67	3	9	9	1	9											
	มีความแปลกใหม่	A-2	4.65	1	1	9		3							1				
	รูปทรงสวยงาม	A-3	4.59			3	9		3										
	สีสันสวยงามและประหยัด	A-4	4.55	9	3		3	1											
	สามารถจัดได้หลายรูปแบบ	A-5	4.39																
	ความทนเอนจิ้ง	A-6	4.37	1	1				1	1									
วัสดุ	วัสดุที่ใช้มีคุณภาพ	A-7	4.53						3	9		9						1	
	เนื้อดินมีความละเอียด	A-8	4.49			3			9	3		3			1			1	
	วัสดุมีความเหมาะสม	A-9	4.43						1	1									
	วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตราย	A-10	4.42																
อายุการใช้งาน	ใช้งานหรือถอดง่าย	A-11	4.38	9	1		1				9		3						
	ใช้งานได้นาน	A-12	4.31						3		3	3	3						
	มีความแข็งแรงทนทาน	A-13	4.27											1					
การใช้งาน	ตั้งโชว์และประดับตกแต่งได้	A-14	4.66	3	3	1	3	9		1				9		3	1		
	นำไปเป็นของขวัญระลึก	A-15	4.59	1	3	1	3	9		3				9		3	1		
	นำไปใช้ประดับของตกแต่งภายใน	A-16	4.35							1				3		9			
	นำไปเป็นของสะสม	A-17	3.86	1	3					3				9		3	1		
	ขนาดเหมาะสม	A-18	4.62							9								1	
ความสะดวก	น้ำหนักเบา	A-19	4.37						3							1			
	ทำความสะอาดได้ง่าย	A-20	4.16						1					9					
	เก็บรักษาง่าย	A-21	3.86						1						3				
อื่นๆ	ราคามีความเหมาะสม	A-22	3.35	3	3	3	3	3	3	1	3	1	1	1			9		
ค่าสัมประสิทธิ์การวางแนวของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์				3	4	5	6	1	9	7	10	13	11	15	2	14	8	12	รวม
ค่าสัมประสิทธิ์การวางแนวของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์			135.9	118.5	117.0	115.3	158.2	85.8	114.2	81.7	60.3	70.5	38.2	145.0	53.5	87.5	61.5	1442.9	
ค่าสัมประสิทธิ์การวางแนวของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยปริยายเทียบ			9.42	8.21	8.11	7.99	10.96	5.95	7.91	5.66	4.18	4.89	2.65	10.05	3.71	6.06	4.27	100.00	
เป้าหมายทางด้วเทคนิค																			

รูปที่ 3 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ

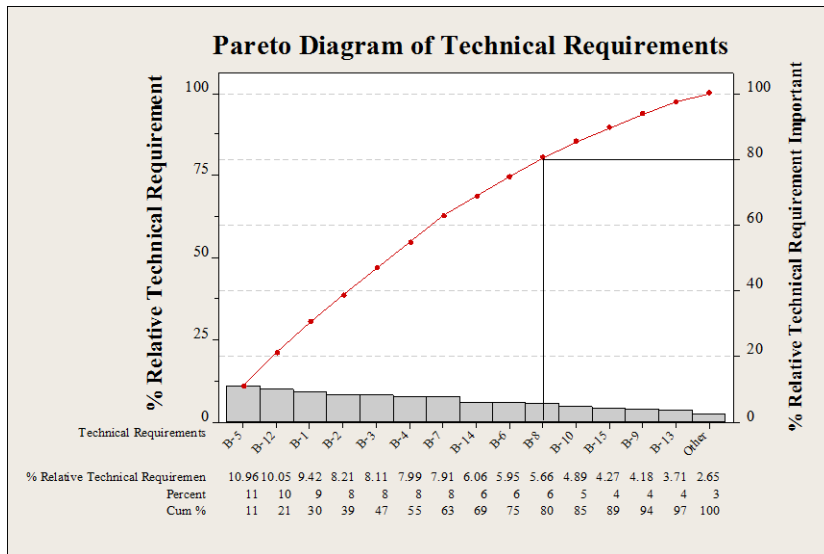
(4) ความเกี่ยวเนื่องทางเทคนิค จากการระดมสมองของฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่าผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์แต่ละข้อกำหนดมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน แสดงดังส่วนที่ 4 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 3

(5) ความสัมพันธ์ ในการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้บริโภคและข้อกำหนดทางเทคนิคของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ พบว่าได้ผลการให้คะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการให้คะแนนได้ทำการเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ โดยใช้การระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเซรามิก แสดงดังส่วนที่ 5 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 3

6) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ พบว่ามีการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก และสามารถสรุป

ผลได้ว่าการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิกมีคุณลักษณะการออกแบบที่มีคะแนนสูงสุด 10 ข้อ หรือสิ่งที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญเป็นลำดับแรก ๆ ตามหลักการแผนภาพพารेटโต [6] แสดงดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 สามารถนำข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ที่มีระดับความสำคัญสูงสุด 10 ข้อแรก ตามหลักการพารेटโตไปสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์ให้กับผู้ผลิต แต่เนื่องจาก QFD เป็นการแปลงความต้องการของผู้บริโภคเพื่อสร้างข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงเทคนิค โดยไม่ได้รวมอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้น ได้นำเทคนิควิศวกรรมคั่นเซเพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์ ความรู้สึกของผู้บริโภคในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 4 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์และโดยเปรียบเทียบ



จากรูปที่ 4 สามารถนำข้อกำหนดทางเทคนิค สมบูรณ์และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ที่มีระดับ ความสำคัญสูงสุด 10 ข้อแรก ตามหลักการพาเรโต ไปสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์ให้กับผู้ผลิต แต่เนื่องจาก QFD เป็นการแปลงความต้องการของผู้บริโภค เพื่อสร้างข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนา ผลิตภัณฑ์เชิงเทคนิค โดยไม่ได้รวมอารมณ์ ความรู้สึกของผู้บริโภคเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้น ได้นำเทคนิควิศวกรรมคันเซเพื่อแสดงให้เห็น ถึงอารมณ์ ความรู้สึกของผู้บริโภคในขั้นตอนถัดไป

3.2 ผลการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซ

3.2.1 ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก

จากการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 3 รวบรวม คำแสดงความรู้สึก (Kansei Word) แสดงถึงชุดถ้วยชาเซรามิก มีค่าแสดงความรู้สึกที่ผ่านการประเมิน (IOC > 0.5) [18] และผ่านการคัดเลือก โดยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ และด้านการขึ้นรูป เพื่อกำหนดคำแสดงความรู้สึกที่สามารถสื่อถึง

ความรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก จำนวน 9 คำแสดงความรู้สึก จากผลการรวบรวม ทั้งหมด 44 คำแสดงความรู้สึก ดังตารางที่ 1

3.2.2 ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

การรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับ ผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก โดยมีจำนวน คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ 10 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และ 22 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย เมื่อนำไปสำรวจ ด้วยแบบสอบถามที่ 4 ของผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชา เซรามิกจากการประเมินคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก ทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยที่ได้เท่ากับ 4.01 ดังนั้นคุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จาก การประเมินทั้งหมด ($\bar{x} \geq 4.01$) และผ่านการคัดกรอง จากผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ พบว่า คุณลักษณะ ที่ถูกคัดเลือกมีจำนวน 6 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก 14 คุณลักษณะย่อย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก

ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึกทั้ง 9 คำ			
คำแสดงความรู้สึก	IOC	คำแสดงความรู้สึก	IOC
	> 0.5		> 0.5
โดดเด่น	0.93	แปลกใหม่	0.55
สวยงาม	0.66	กะทัดรัด	0.55
มีรสนิยม	0.79	แตกต่าง	0.55
สร้างสรรค์	0.76	อัตลักษณ์	0.52
มีคุณค่า	0.66		

ตารางที่ 2 ผลการกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x} \geq 4.01$)
1	ลักษณะของซ็อนกาแพ	วางบนซ็อนใต้, หัวซ็อนมีรูปทรงพิเศษ, ปลายซ็อนมีรูปทรงพิเศษ	4.52
2	รูปทรงของแก้ว	ทรงกลม, ทรงลักษณะพิเศษ	4.45
3	ลวดลายของผลิตภัณฑ์	ลวดลายท้องถิ่น, ลวดลายไทย	4.43
4	โทนสีของผลิตภัณฑ์	สีสนสไต, สีอ่อน, สีทึบ	4.36
5	รูปทรงจานรอง	เรขาคณิต, ลักษณะพิเศษ	4.36
6	ลักษณะพิเศษของหูจับ	ถอดออกได้, หูจับมีรูปทรงพิเศษ	4.20

3.2.3 ผลการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์

ผลการรวบรวมภาพจากแหล่งข้อมูล เช่น นิตยสาร ผู้เชี่ยวชาญ ผู้ใช้งานที่มีประสบการณ์ เป็นต้น ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ ชุดถ้วยชาเซรามิก ที่มีคุณลักษณะหลากหลาย มีจำนวน 39 ภาพ จากนั้นทำการประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงสำหรับแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ตามขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 2 และดำเนินการเปรียบเทียบจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เพื่อหาภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติครอบคลุมตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุดมาเป็นภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ดังนั้นสรุปได้ว่ามีภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่ครอบคลุมคุณลักษณะย่อยได้มากที่สุดมีจำนวนทั้งสิ้น 4 ภาพ แสดงดังรูปที่ 5

3.2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเซิงปริมาณประเภทที่ 1

ผลการนำข้อมูลจากแบบสอบถามที่ 3 มาวิเคราะห์ทฤษฎีเซิงปริมาณประเภทที่ 1 หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณของผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ระหว่างกลุ่มของตัวแปรอิสระทุกตัว (คุณลักษณะผลิตภัณฑ์) กับ

ตัวแปรตาม (ค่าคะแนนค่าแสดงความรู้สึก) พบว่ามีค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า $MCC^2 > 0.7$ [19] จำนวน 5 ค่า ได้แก่ สวยงาม แตกต่าง แปลกใหม่ อัดลักษณะ และมีคุณค่า

ดังนั้น นำข้อมูลค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า $MCC^2 > 0.7$ ก่อนหน้าจำนวนทั้ง 5 ค่า ที่ผ่านเกณฑ์ไปวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (Partial Correlation Coefficient: PCC) และ หาค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (Category Score: CS) ด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 และดำเนินการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เพื่อกำหนดข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะสำหรับการออกแบบ โดยมีเกณฑ์การคัดเลือก คือ คัดเลือกเฉพาะคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และหาค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย ที่มีค่าการวิเคราะห์เป็นค่าบวกที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($P < 0.05$) [8]

ดังนั้น ผลการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์มี 5 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก คือ ลวดลายลักษณะพิเศษของหูจับ โทนสี รูปทรงฐานรองแก้ว และรูปทรงแก้วชา/กาแพ และ 5 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย แสดงดังตารางที่ 3



ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 1



ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 2



ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 3



ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 4



รูปที่ 5 ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาที่ผ่านการคัดเลือก

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ		คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	ค่าแสดงความรู้สึก		ภาพแนวทางการออกแบบ	MCC ²	
		PCC	P-Value		CS	P-Value			ที่สื่อถึงคุณลักษณะ
1	ลวดลายของผลิตภัณฑ์	1.048	0.000	ผลิตภัณฑ์มีลวดลายท้องถิ่น	1.050	0.000	อัตลักษณ์ ภาพที่ 3	0.94	
		0.643	0.000		0.896	0.000		มีคุณค่า	0.81
		0.455	0.001		0.455	0.001		สวยงาม	0.80
2	ลักษณะพิเศษของหูจับ	1.478	0.000	หูจับมีรูปทรงที่มีลักษณะพิเศษ	1.478	0.000	แตกต่าง ภาพที่ 1	0.82	
3	โทนสีของผลิตภัณฑ์	0.423	0.000	ผลิตภัณฑ์มีโทนสีที่บ	0.303	0.000	แปลกใหม่ ภาพที่ 4	0.77	
		0.384	0.000		0.111	0.000		มีคุณค่า ภาพที่ 3	0.81
4	รูปทรงจานรองแก้ว	0.702	0.000	จานรองแก้วชา/กาแฟมีรูปทรงที่มีลักษณะรูปทรงพิเศษ	0.843	0.000	แปลกใหม่ ภาพที่ 4	0.77	
		0.600	0.000		0.628	0.000		สวยงาม ภาพที่ 3	0.80
5	รูปทรงแก้วชา/กาแฟ	0.600	0.000	แก้วชา/กาแฟมีรูปทรงที่มีลักษณะรูปทรงพิเศษ	0.628	0.000	สวยงาม ภาพที่ 3	0.80	

3.2.5 ผลการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก

จากการแปลงความต้องการของผู้บริโภคด้วยเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) พบว่าสามารถสรุปข้อกำหนดในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ได้ 9 ข้อ เนื่องจาก QFD เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของผู้บริโภค เพื่อสร้างข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์

เชิงเทคนิค โดยไม่ได้รวมอารมณ์ และความรู้สึกของผู้บริโภคเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้น จึงได้นำเทคนิควิศวกรรมคันเซ (KE) มาวิเคราะห์ในการหาข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะสำหรับการออกแบบร่วมกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Kikumoto [20] และ M. Zeydan [21] เพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์และความรู้สึกของผู้บริโภค พบว่า สามารถกำหนดข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่สื่อถึงความรู้สึกได้จำนวน



ทั้งหมด 5 ข้อ ดังนั้น สามารถสรุปข้อกำหนดในการ
ออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิกได้จำนวน 13

ข้อ จากจำนวนทั้งหมด 15 ข้อ เนื่องจากมีข้อกำหนด
2 ประเด็นที่คล้ายกัน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อกำหนดในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก

ลำดับ	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
1	อัตลักษณ์ท้องถิ่น	ผลิตภัณฑ์มีการแสดงถึงอัตลักษณ์ท้องถิ่นของภาคใต้และมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากสินค้าของฝากของที่ระลึกแหล่งอื่น
2	ใช้งานได้หลากหลาย	ผลิตภัณฑ์สามารถตั้งโชว์ ประดับตกแต่ง ของฝากของที่ระลึก
3	ลวดลายของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะลวดลายท้องถิ่น โดยนำรูปทรงของเรือกอกและมาตัดทอนเป็นลวดลายชุดถ้วยชาเซรามิก
4	ผลิตภัณฑ์มีรูปแบบ/ รูปทรงแปลกใหม่	ผลิตภัณฑ์มีรูปแบบที่แปลกใหม่ ตามธรรมชาติ และแสดงเอกลักษณ์ของจังหวัดสงขลา และภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย
5	ผลิตภัณฑ์มีความ สวยงาม	ผลิตภัณฑ์มีความสวยงามในหลากหลายมิติ
6	ขนาดของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีขนาดที่กะทัดรัด และเหมาะสม
7	มีประโยชน์ใช้สอย	ผลิตภัณฑ์มีประโยชน์ใช้สอยเหมาะสมกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์การ เหมาะสมกับการใช้งาน ใช้งานที่กำหนดไว้
8	ดินมีความละเอียด	ผลิตภัณฑ์มีการกรองดินอย่างน้อย 2 ครั้ง
9	ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ	ผลิตภัณฑ์มีการเลือกใช้วัสดุและวัตถุดิบที่มีคุณภาพ
10	ลักษณะพิเศษของหูจับ	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบหูจับ หรือมือจับ มีรูปทรงของหัวเรือกอกและมาตัดทอนเป็นหูจับ
11	โทนสีของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะโทนสีเป็นโทนสีฟ้าหรือน้ำเงินที่สื่อถึงความเป็นน้ำทะเล พร้อมทั้งตัดด้วยลวดลายสีขาว
12	รูปทรงจานรองแก้ว	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบรูปทรงจานรองแก้วให้มีรูปทรงของหัวเรือกอกและมาตัดทอนเป็นรูปทรงของจานรองแก้ว
13	รูปทรงแก้วชา/กาแฟ	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะรูปทรงของชุดถ้วยชาเซรามิกให้มีรูปทรงกลม



จากนั้นผู้วิจัยดำเนินการส่งข้อกำหนดเชิงเทคนิคและเชิงคุณลักษณะ 13 ข้อข้างต้นให้กับทีมออกแบบดำเนินการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการออกแบบครั้งนี้ ทีมออกแบบได้กำหนดค่าแสดงความรู้สึกจำนวน 3 ค่า คือ ความสวยงาม แปลกใหม่ และอัตลักษณ์ เพราะทีมออกแบบมองว่าเป็นค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงแบบผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก พร้อมทั้งนำแรงบันดาลใจต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาออกแบบร่วมกัน หลังจากนั้นส่งแบบผลิตภัณฑ์ให้กับผู้ผลิตเซรามิกสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบพร้อมตกแต่ง แสดงดังรูปที่ 6

3.2.6 ผลการประเมินความพึงพอใจ

หลังจากได้ดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบชุดถ้วยชาเซรามิก จากนั้นผู้วิจัยได้นำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้กลุ่มผู้บริโภคและผู้ผลิตประเมินความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ พบว่า ผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้บริโภค กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย นักท่องเที่ยวและกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิก จังหวัดสงขลา มีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านอัตลักษณ์ท้องถิ่นมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.58 ในส่วนระดับความพึงพอใจประเด็นรองลงมาคือ คุณลักษณะด้านผลิตภัณฑ์ที่มีความสวยงาม โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 ซึ่งผลความพึงพอใจของผู้บริโภคมีความสอดคล้องกับงานวิจัย [22, 23] กล่าวคือ โดยทั่วไปการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่า ประเด็นด้านสี สันสวยงาม ความสวยงามของผลิตภัณฑ์จะมีผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคเป็นอันดับแรก



รูปที่ 6 ผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับเทคนิควิศวกรรมคั่นเซ สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิกเพื่อลดข้อร้องเรียนจากผู้บริโภค และเพื่อสร้างความพึงพอใจของผู้บริโภค งานวิจัยนี้ได้แปลงความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ เข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบวัสดุ อายุการใช้งาน การใช้งาน ความสะดวก และอื่น ๆ โดยเฉพาะด้านของอัตลักษณ์ท้องถิ่นที่สามารถสร้างความพึงพอใจมากที่สุดเป็นอันดับแรก



เนื่องจากเทคนิค QFD เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของผู้บริโภค เพื่อสร้างข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงเทคนิค โดยไม่ได้รวมอารมณ์ และความรู้สึกของผู้บริโภคเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้น การนำเทคนิควิศวกรรมคันทเซมมาร่วมในการวิเคราะห์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์ ความรู้สึกของผู้บริโภค ผลการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันทเซ พบว่า คำแสดงความรู้สึกที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก ประกอบด้วย 3 คำหลัก ๆ คือ ความสวยงาม แปลกใหม่ และอัตลักษณ์ และมีองค์ประกอบในการออกแบบผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 5 คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์หลัก คือ ลวดลายของผลิตภัณฑ์ ลักษณะพิเศษของหูจับ โทนสีของผลิตภัณฑ์ รูปทรงจานรองแก้ว และรูปทรงแก้วกาแฟที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการเชิงอารมณ์ของลูกค้าได้มากขึ้น จากการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ผู้บริโภคมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านอัตลักษณ์ที่ถ่องถื่นมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.58 และมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านผลิตภัณฑ์ที่มีความสวยงามเป็นอันดับสอง โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี 2564 ขอขอบคุณผู้ผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกจังหวัดสงขลา กรณีศึกษา ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญที่มออกแบบทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนดำเนินงานสำเร็จลุล่วง และขอบคุณกลุ่มผู้บริโภคที่ให้

ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Sompala, L. Lertkulprayad, Motivation and marketing mix Influencing tourists buying behavior at ceramic outlet lampang province thailand, Dusit Thani College Journal, 2016, 11(1), 205-223. (in Thai)
- [2] A. Indraphadung, N. Srisanit, Design and development software for small and medium ceramics industrial improvement with quality function development, Srinakharinwirot University Journal of Science and Technology, 2010, 2(1), 126-135. (in Thai)
- [3] Chiang Mai University School of Public Policy, The study of ceramics industry strategy, Research Report, Chiang Mai University, 2014. (in Thai)
- [4] A. Keawwandee, An application of quality function development technique for the design and development of leather products, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2002.
- [5] C. Sritong and O. Sritong, Product development using quality function deployment (QFD) in furniture Industry: A case study of office chair design, Valaya Alongkorn Review Humanities and Social Science, 2016, 6(2), 111-124. (in Thai).



- [6] R. Sinthavalai, S. Ruengrong, An application of house of quality (HOQ) for designing rice product as a souvenir, Naresuan University Journal: Science and Technology, 2018, 26(3), 36-51. (in Thai)
- [7] A.T. Pambudi, M.R. Suryoputro, A.D. Sari, R.D. Kurnia, Design of lesehan chair by using kansei engineering method and anthropometry approach, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 1-9.
- [8] S. Yodwangjai, Product design and development for dinner chair of Kansei Engineering, KKU Engineering Journal, 41(2), 2014, 191-200. (in Thai).
- [9] J. Vieira, J.M. Osorio, S. Mouta, P. Delgado, A. Portinha, J. F. Meireles, J.A. Santos, Kansei Engineering as a tool for the design of in-vehicle rubber keypads, Applied Ergonomics, 2017, 61, 1-11.
- [10] N. Khumpong, C. Kasemset, Application of kansei engineering in food product development framework: a case study of parboiled rice, The 2012 Industrial Engineering Network Academic Conference (IE-Network 2012), Proceeding, 2012, 2030-2037. (in Thai)
- [11] L. Silano, How to use the appropriate statistical formulas for determining the sample size for quantitative research designs in the humanities and social science study, Journal of Research and Development Buriram Rajabhat University, 2017, 12(2), 50-61. (in Thai)
- [12] N. Meemongkol, P. Junsong, W. Santiamornrut, Application of quality function deployment technique for searching of device characteristic and design of health care monitoring device. KKU Research Journal, 2013, 17(4), 515-527. (in Thai)
- [13] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, K. Pochana. Application of a quality function deployment technique to design and develop furniture products, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2012, 34(6), 663-668. (in Thai)
- [14] R. Sinthavalai, P. Boonchu, S. Polmai, An application of house of quality (HOQ) in Improving a package of medical equipment, The Journal of KMITNB, 2016, 26(3), 437-450. (in Thai)
- [15] K. Somthong, N. Pianthong, Development of chinese sausage product using quality function deployment, Thai Industrial Engineering Network Journal, 2016, 2(1), 19-26. (in Thai)



- [16] S. Fan, J. Xiong, T. Xu, S. Chen, W. Zhang, QFD design of machine - made sand based on independent/decomposition axiom, *Procedia Engineering*, 2017, 174, 442-448.
- [17] Y. Akao, *Quality function deployment: Integrating customer requirements into product design*, Productivity, Press Cambridge, MA. England, 1990.
- [18] P. Meehanpong, K. Chatdokmaiprai, Assessing quality of research instrument in nursing research, *Journal of The Royal Thai Army Nurses*, 2018, 19(1), 9-15. (in Thai)
- [19] M. Russameesritrakul, P. Taweasuk, The influence of attitudes towards the decision making process of eco-friendly packages in chatuchak, Bangkok, *Suthiparithat Journal*, 2020, 34(110), 251-267. (in Thai)
- [20] M. Kikumoto, Y. Kurita, S. Ishihara, Kansei engineering study on car seat lever position, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2021, 86, 1-19.
- [21] M. Zeydan, A. Ocal, A rule-based approach to sofa design with kansei engineering, *Journal of Industrial Engineering*, 2021, 32(1), 68-89.
- [22] T. Pirom, S. Rawangwong, A. Thongkamkaew, C. Hutyee, Design and developed product the kindergarten classroom furniture with rubber wood using quality function development, *The Journal of Industrial Technology*, 2019, 15(3), 76-91. (in Thai)
- [23] R.J. LU, Y.X. Feng, H. Zheng, J.R. Tan, A product design based on interaction design and axiomatic design, *Procedia CIRP*, 2016, 53, 125-129.

ระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร

หทัยรัตน์ เกตุมณีชัยรัตน์^{1*} และ บรรณทัศน์ สร้อยระย้า²

¹ ภาควิชาการจัดการเทคโนโลยีการผลิตและสารสนเทศ, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² บริษัท ไอโอเมด เทคโนโลยี จำกัด

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: hathairat.k@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 กันยายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 19 ตุลาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 26 ตุลาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: ระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตรจัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารของวัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ ของใช้ พนักงาน และผู้ป่วยที่มีการนำออกไปนอกพื้นที่หรือถูกขโมยแบบเรียลไทม์ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรโดยใช้เทคโนโลยี Bluetooth 5.1 แบบ AOA (Angle of Arrival) โดยระบบจะประกอบด้วยส่วนที่ 1 ฮาร์ดแวร์สำหรับใช้ในระบบฯ จำนวน 1 ชุด และส่วนที่ 2 ซอฟต์แวร์ระบบฯ ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์จะมีตัวรับสัญญาณ (Receive Node) ที่จะต้องนำไปติดตั้งให้ครอบคลุมบริเวณพื้นที่หรือห้องต่าง ๆ ในบริเวณอาคาร โดยพิจารณาถึงระดับสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการค้นหา และตัว Tag ที่ติดกับอุปกรณ์หรือบุคคลเพื่อส่งสัญญาณ ส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ระบบฯ จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกราฟแสดงผลทางแผนที่ (Map) เพื่อใช้ในการค้นหา และส่วนที่เป็นการจัดการอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (Administration) โดยผลการทดสอบระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตรนั้นมีความแม่นยำในระดับเซนติเมตรและมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากสถานที่ทดสอบครั้งที่ 1 ประมาณ 67.1 เซนติเมตร และครั้งที่ 2 ประมาณ 40.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าสัญญาณ Bluetooth แบบทั่วไปที่มีความคลาดเคลื่อน 300-500 เซนติเมตร และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

คำสำคัญ: เรียลไทม์; ระบบติดตามตำแหน่ง; เซนติเมตร; ตำแหน่ง; ตัวรับสัญญาณ

Centimeter Indoor Real-Time Location System

Hathairat Ketmaneechairat^{1*} and Banatus Soiraya²

¹ Department of Information and Production Technology Management, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² IO MED TECHNOLOGIES Co., Ltd.

* Corresponding author, E-mail: hathairat.k@cit.kmutnb.ac.th

Received: 1 September 2022; Revised: 19 October 2022; Accepted: 26 October 2022

Online Published: 15 December 2022

Abstract: Centimeter-level real-time indoor location tracking system has been developed as a prototype of a real-time tracking system for indoor location tracking for tools, equipment, supplies, staff, and patients that have been taken outside the area or stolen with centimeter accuracy using the AOA (Angle of Arrival) and Bluetooth 5.1 technology. The system consists of part 1 hardware for use in the system and part 2 software system. The hardware part has a set of receivers (Receive Nodes) that must be installed to cover different areas or rooms in the building by considering the signal level to cover the searched area and the tags attached to the devices or the persons for transmitting the signal. The part of the software system consists of a section that displays a map (Map) for searching and a device management part (Administration). The results of the ten centimeter-scale real-time indoor location tracking systems tests were accurate to the centimeter scale and had an average deviation from the first test were approximately 67.1 centimeters and the second test were approximately 40.5 centimeters respectively, which were better than conventional Bluetooth signals with a deviation of 300-500 centimeters and is according to our research objectives.

Keywords: Real Time; Location System; Centimeter; Location; Receive Node



1. บทนำ

ปัจจุบันถึงแม้ว่าการใช้ระบบ GPS นั้นเป็นที่นิยมแพร่หลายสำหรับการนำทางและการติดตามรถ วัตถุประสงค์ เนื่องจากการใช้ดาวเทียมครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก แต่ทว่าการใช้งานระบบดังกล่าวจะไม่สามารถเป็นไปได้อย่างแม่นยำในอาคารสถานที่ปิดที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้ประกอบทั้งเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย ต่างๆ เช่น WIFI และ Bluetooth ที่นำมาใช้สำหรับการบอกตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor Positioning Systems) เองนั้นส่วนใหญ่จะทำการประมาณจากค่า Receiver's Received Signal Strength Indicator (RSSI) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์การหาทิศทางที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงในระดับเมตร เช่น ใน Bluetooth 3-5 เมตร และ WIFI จะมีค่าสูงกว่า 5 เมตร โดยประมาณ ดังนั้นจึงส่งผลให้การบอกตำแหน่งภายในอาคาร หรือการติดตามวัตถุ และบุคคลให้ผลที่คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงค่อนข้างสูงส่งผลให้คุณภาพการบริการเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามได้มีเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra-Wide Band: UWB) ซึ่งใช้ความถี่ย่าน 3.1-10.6 GHz มาแก้ไขปัญหานี้แต่ต้นทุนยังสูงมากอยู่ ปัจจุบันเองทางกลุ่ม Bluetooth SIG ได้ออกข้อกำหนด Bluetooth Direction Finding [1] มาในมาตรฐาน Bluetooth 5.1 เรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะทำให้การหาทิศทาง (Direction finding) มีความแม่นยำสูงมากขึ้นโดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ Angle of Arrival (AOA) [2] และ Angle of Departure (AOD) การหาตำแหน่งของเซ็นเซอร์ไร้สายจะใช้วิธีการ Angle of Arrival (AOA) เป็นการค้นหาตำแหน่งของ

วัตถุจากทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกมาจากวัตถุถึงจุดรับสัญญาณจำนวนตั้งแต่ 3 จุดขึ้นไป หรือเรียกว่าวิธีการ Triangulation [3-6] Angle of Departure (AOD) เป็นวิธีการคำนวณมุมที่ออกจากตัวส่งสัญญาณ การใช้ AOA นั้นตัวรับต้องเป็นแบบ Multi-Antenna Array ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์การหาทิศทางมีความแม่นยำที่สูงมากในระดับเซนติเมตร (โดยประมาณ คือ 30-50 เซนติเมตร) และยังมีต้นทุนที่ต่ำกว่าซึ่งถ้านำมาประยุกต์ใช้งานกับ Real time Locating System (RTLS) [7] เข้าด้วยกันจะทำให้การติดตามมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [8,9]

ตัวอย่างการใช้งาน Real Time Locating Systems (RTLS) [10] ในงานบริการด้านสุขภาพ เช่น โรงพยาบาลจะช่วยให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการอุปกรณ์ราคาแพง เช่น IV Pump และเครื่องช่วยหายใจผู้ป่วยวิกฤติลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การใช้งาน RTLS ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนการบริหารจัดการผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน สำหรับงานด้านคลังสินค้า [11] เช่น การติดตามตำแหน่งของรถยกพาเลทและคนงานในคลังสินค้า ก็มีการนำ RTLS ไปใช้งานเพื่อการจัดการที่ดีขึ้นของทรัพยากรและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของวัสดุได้เช่นเดียวกัน

โรงพยาบาลจำนวนมากในสหรัฐอเมริกาและยุโรป ได้มีการติดตั้ง RTLS และนำมาประยุกต์เข้ากับ HIS หรือ Hospital Information System ซึ่งเมื่อมี RTLS มาเชื่อมต่อกันแล้ว การติดตามเครื่องมือทางการแพทย์ที่มีความสำคัญจะสามารถช่วยลดเวลาการเข้าถึงเครื่องมือและลดการสูญหายได้เป็นอย่างมาก



การติด Tag ไว้ที่ตัวคุณหมอก็สามารถเรียกตัวคุณหมอที่อยู่ใกล้กับผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการลงทุน RTLS ถือเป็นการลงทุนที่ให้ผลตอบแทนอย่างรวดเร็ว เพราะเพียงช่วยชีวิตคนไข้ได้ 1 ราย ก็ถือว่าคุ้มค่าแล้ว

Benjamin Tatham และ T. Kunz [12] ได้ทำงานวิจัยที่นำเสนอผลกระทบของตำแหน่งในการวางโหนดอ้างอิง ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับผู้ออกแบบระบบเครือข่ายและผู้ใช้งานเครือข่ายเช่นเซอร์โวลายที่ ต้องการประเมินคุณภาพของสมรรถนะในการระบุตำแหน่ง โดยการวิจัยนี้ได้พิจารณาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบในการหาตำแหน่งในการวางโหนดอ้างอิงที่ดีที่สุด คือ ค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของตำแหน่งโหนดอ้างอิง พื้นที่ครอบคลุมของเครือข่าย และคุณลักษณะของรูปสามเหลี่ยมที่ลากจากโหนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งจำนวน 3 โหนด

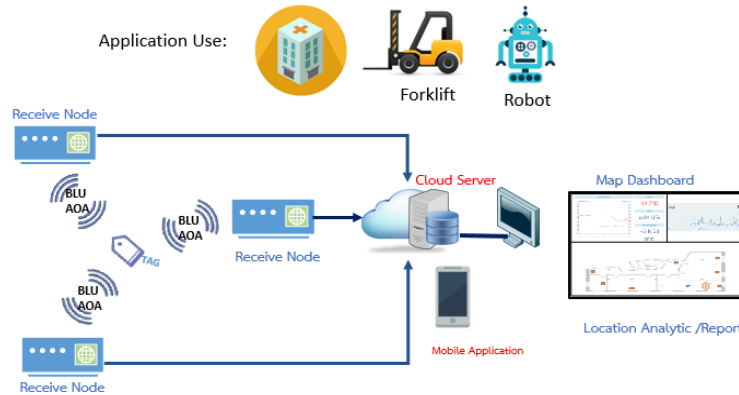
ดังนั้น ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยี Bluetooth 5.1 ที่มีความสามารถหาทิศทาง (Direction Finding) โดยใช้เทคนิคแบบ Angle of Arrival (AOA) มาพัฒนาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการและนำมาประยุกต์เพื่อทดสอบใช้งานกับหน่วยงานต่าง ๆ เช่น โรงพยาบาล เพื่อเป็นการบริการติดตามผู้ป่วย หรือการค้นหาอุปกรณ์ทางการแพทย์ และสำหรับโรงงาน หรือคลังสินค้า เพื่อใช้ในการติดตามของในโรงงาน หรือคลังสินค้าให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนาระบบฯ จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ (1) ฮาร์ดแวร์สำหรับใช้ในระบบฯ จำนวน 1 ชุด

ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับสัญญาณ (Receive Node) ให้ครอบคลุมพื้นที่การให้บริการและห้องที่ต้องการใช้งาน (2) ซอฟต์แวร์ระบบฯ ในรูปแบบคลาวด์ จำนวน 1 ระบบ โดยจะมีระยะการพัฒนาและการนำไปทดสอบกับหน่วยงาน โรงพยาบาล และโรงงาน หรือคลังสินค้า จำนวน 10 แห่ง โดยผลที่ได้รับจะนำมาทำรายงานสรุปและนำมาปรับปรุงการใช้งานให้มีประสิทธิภาพต่อไป

ระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาต้นแบบระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารของวัสดุเครื่องมือ อุปกรณ์ ของใช้ พนักงาน และผู้ป่วยที่มีการนำออกไปนอกพื้นที่หรือขโมยแบบเรียลไทม์ ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตร จำนวน 1 ระบบ โดยระบบที่จะนำไปติดตั้งจะต้องมีความครอบคลุมบริเวณพื้นที่หรือห้องต่าง ๆ ภายในบริเวณอาคาร ซึ่งจากรูปที่ 1 จะมีจำนวนทั้งสิ้น 3 หน่วยและอาจจะมีมากกว่านี้ได้ โดยพิจารณาถึงระดับสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการค้นหา ส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ระบบฯ จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นการแสดงผลทางแผนที่ (Map) เพื่อใช้ในการค้นหาและส่วนที่เป็นการจัดการอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (Administration) โดยหลังจากที่ได้มีการพัฒนาระบบฯ เรียบร้อยแล้วจะมีการนำระบบฯ ที่ได้ไปทำการทดสอบการใช้งานกับโรงพยาบาล และโรงงาน หรือคลังสินค้า จำนวน 10 แห่ง โดยมีภาพรวมของระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร ดังรูปที่ 1

Centimeter Indoor RTLS



รูปที่ 1 แสดงภาพรวมการทำงานของระบบ Centimeter Indoor Real Time Location System

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การวิเคราะห์และออกแบบระบบฮาร์ดแวร์

องค์ประกอบหลักของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารของระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตรนี้แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย ตัวรับสัญญาณ (Receive Node) หรือ โหนดอ้างอิง (Reference Node) โหนดวัตถุ (Target Node) หรือตัว Tag Node โหนดประมวลผล (Processing Node) และแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ (Application Server) ซึ่งโหนดวัตถุจะเป็นอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่สามารถเคลื่อนที่ได้สำหรับนำไปติดตั้งสิ่งของที่ต้องการติดตามตำแหน่ง โดยมีโหนดอ้างอิงเป็นอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ทำหน้าที่รับค่าความแรงของสัญญาณและมุมของโหนดวัตถุต่าง ๆ โหนดอ้างอิงนี้จะถูกติดตั้งในส่วนต่าง ๆ ของอาคารเพื่อใช้อ้างอิงตำแหน่งของโหนดวัตถุ ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังโหนดประมวลผลเพื่อคำนวณหาตำแหน่งของโหนดวัตถุ แล้วส่งไปยังแอปพลิเคชัน

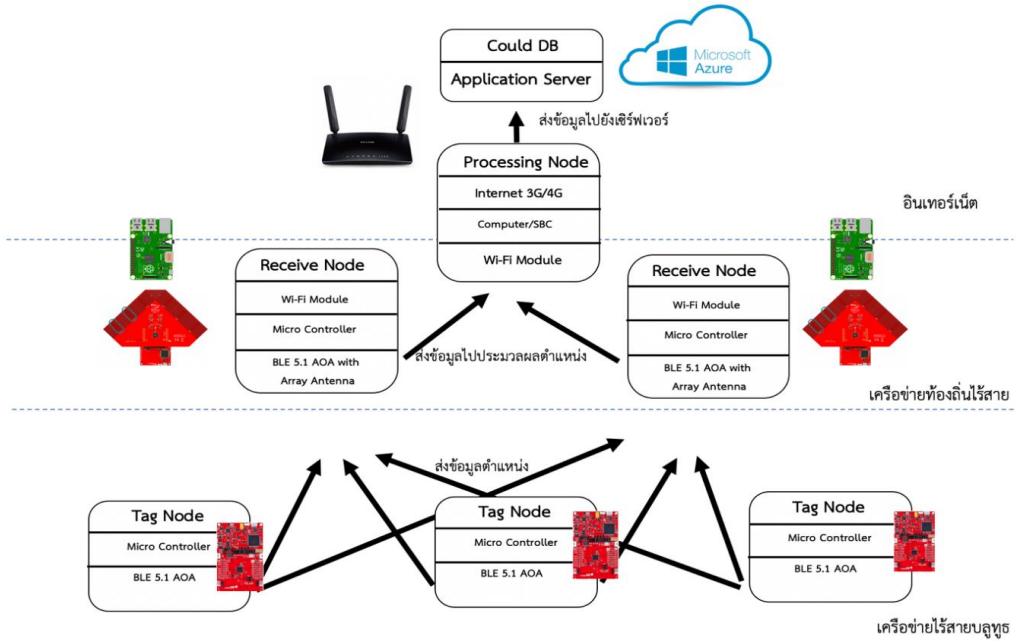
เซิร์ฟเวอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้เพื่อแสดงตำแหน่งของโหนดวัตถุและบริหารจัดการระบบ ทั้งนี้ โหนดประมวลผลอาจจะอยู่ในแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ก็ได้ จากรูปที่ 3 เป็นการนำเสนอพัฒนาฮาร์ดแวร์ของระบบโดยโหนดวัตถุได้ใช้อุปกรณ์ Ti LCC26X2R1 จะส่งสัญญาณการค้นหาทิศทางพิเศษไปยังโหนดอ้างอิงที่ประกอบด้วย Ti CC26X2R1 และ Raspberry Pi 3 ซึ่งในโหนดอ้างอิงจะมี BOOSTXL-AOA ที่เป็นสายอากาศหลายตัวจัดเรียงในอาร์เรย์ ทำหน้าที่อ่านค่า Angle of Arrival (AOA) ที่เป็นวิธีที่ใช้สายอากาศเพื่อหาเส้นทางจากอุปกรณ์ โดยจะมีการกำหนดทิศทางเมื่อมีสัญญาณที่ส่งผ่านไปยังอาร์เรย์ ส่วนของภาครับสัญญาณของโหนดอ้างอิงจะเห็นความแตกต่างของเฟสสัญญาณเนื่องจากความแตกต่างของระยะทางจากสายอากาศแต่ละอันในแต่ละอาร์เรย์กับสายอากาศส่งสัญญาณ โดยจะใช้ตัวอย่าง IQ ของสัญญาณขณะสลับระหว่างสายอากาศที่ใช้งานอยู่ในอาร์เรย์ ตามข้อมูลตัวอย่าง IQ เมื่อได้ข้อมูลการคำนวณทิศทางสัมพัทธ์ด้วยวิธีการ



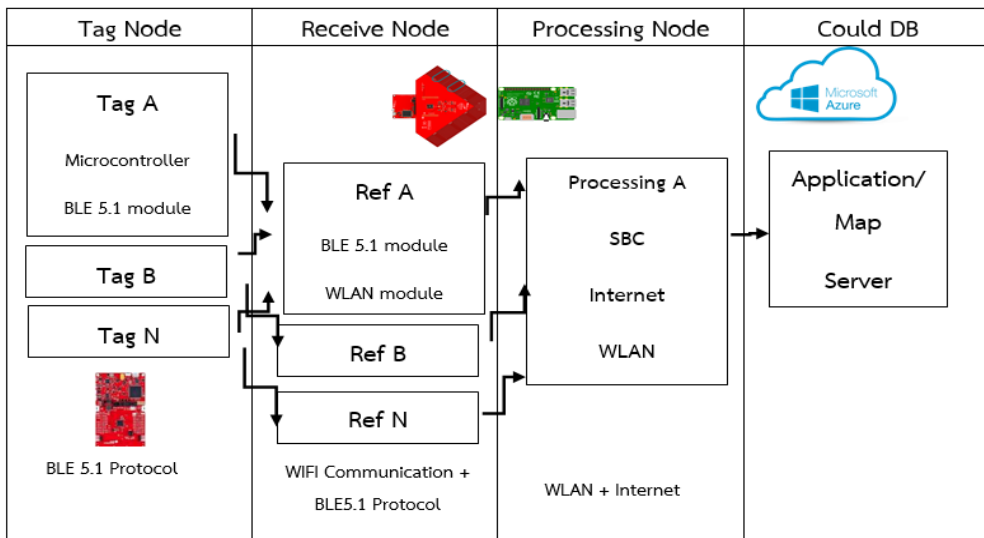
ค้นหาทิศทางของ AOA แล้วจะนำข้อมูลที่ได้อามาสร้าง Payload (Payload) โดยข้อมูลที่ี้จะถูกส่งต่อไปยัง Raspberry Pi 3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดประมวลผลด้วย เพื่อคำนวณหามุมที่ได้จากโหนดอ้างอิงและโหนดวัตถุ ซึ่งในโหนดนี้จะมีการเชื่อมต่อกับเครือข่าย WIFI ของ WIFI router ที่ต่ออยู่กับอินเทอร์เน็ต เพื่อส่งต่อข้อมูลไปยังฐานข้อมูลที่เป็นอยู่บนคลาวด์ของ Microsoft Azure ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เมื่อคลาวด์ได้รับข้อมูลเข้ามาคลาวด์ได้ทำการแบ่งส่วนข้อมูลของ Payload ออกเพื่อให้ทราบตำแหน่งของข้อมูลของ Payload และทราบตำแหน่งของโหนดวัตถุ แล้วบันทึกข้อมูลตำแหน่งที่ส่งมายังฐานข้อมูลและแสดงผลผ่านทางหน้าจอ

รูปที่ 3 อธิบายการทำงานภาพรวมของระบบ โดยเริ่มทำงานจาก Ti CC26X2R1 ซึ่งเป็นโหนดวัตถุแต่ละตัวจะส่งสัญญาณผ่านเครือข่ายไร้สายแบบบลูทูธโดยใช้โปรโตคอล BLE 5.1 เมื่อ Ti CC26X2R1 และ Raspberry Pi 3 ซึ่งเป็นโหนดอ้างอิงได้รับค่ามาจากโหนดวัตถุ ก็ให้นำข้อมูล IQ มาคำนวณทิศทางสัมพัทธ์ด้วยวิธีการค้นหาทิศทางของ AOA แล้วจะนำข้อมูลที่ี้ได้มาสร้าง Payload และส่งไปยัง Raspberry Pi 3 ซึ่งเป็นโหนดประมวลผลผ่านโปรโตคอลสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายที่เข้ามาช่วยรองรับการส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถเชื่อมต่อได้หลายอุปกรณ์และมีฟังก์ชันเรียกกลับ สำหรับตรวจสอบว่าสามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดประมวลผลได้หรือไม่ เมื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดประมวลผลแล้วโหนดอ้างอิงถูกตั้งค่าให้ตรวจจับข้อมูลโหนดวัตถุและส่งไปยังโหนดประมวลผลอีกครั้ง เมื่อข้อมูลถูกส่งมายังโหนดประมวลผล โหนดประมวลผลทำหน้าที่รอรับข้อมูลเพียงอย่างเดียวและ

เมื่อได้รับข้อมูลเข้ามา โหนดประมวลผลทำการตรวจสอบขนาดของ Payload ว่าตรงกับขนาดที่กำหนดไว้หรือไม่ก่อนทำการจะคำนวณหาตำแหน่งของโหนดวัตถุ แล้วส่งต่อข้อมูลไปยังฐานข้อมูลบนคลาวด์ของ Microsoft Azure ที่เป็นคลาวด์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เมื่อคลาวด์ได้รับข้อมูลเข้ามาคลาวด์ได้ทำการแบ่งส่วนข้อมูลของ Payload ออกเพื่อให้ทราบตำแหน่งของข้อมูลของ Payload และทราบตำแหน่งของโหนดวัตถุ แล้วบันทึกข้อมูลตำแหน่งที่ส่งมายังฐานข้อมูลและแสดงผลผ่านทางหน้าจอ การออกแบบระบบ ฮาร์ดแวร์ให้ครอบคลุมพื้นที่การทำงาน (Coverage Area) เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเทคโนโลยีแบบ Bluetooth 5.1 ความถี่ 2.4 Ghz จึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ Receive Node หลายตัวให้ครอบคลุมโดยตัวอย่าง ดังรูปที่ 4 ลักษณะของสัญญาณ Bluetooth 5.1 จะแพร่ครอบคลุมพื้นที่ทำงานได้ 20-50 เมตร ขึ้นอยู่กับลักษณะของสิ่งกีดขวางในแต่ละชั้น ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์จะเป็นการติดตั้ง Receive Node ให้มีระยะห่างระหว่างกัน 20-50 เมตร เป็นต้น หรือจำเป็นต้องวางในพื้นที่เฉพาะเสริมเพิ่มเติมในตำแหน่งที่เป็นจุดอับสัญญาณ ทั้งนี้จะต้องมีการสำรวจวัดค่าสัญญาณจากโปรแกรมตรวจจับสัญญาณ Bluetooth ที่สามารถติดตั้งบนมือถือได้ เช่น Bluetooth Signal Detection เพื่อหาความครอบคลุมของสัญญาณ เป็นต้น ในรูปที่ 4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ Receive Node จำนวน 8 ตัวหรือ 10 ตัวในแต่ละชั้นเพื่อให้สามารถทำงานได้ครอบคลุมพื้นที่ โดยอุปกรณ์ Receive Node มีการเชื่อมต่อสัญญาณ WIFI ไปยัง WIFI Router เพื่อส่งข้อมูลต่อไปประมวลผลที่ Cloud Server ต่อไป

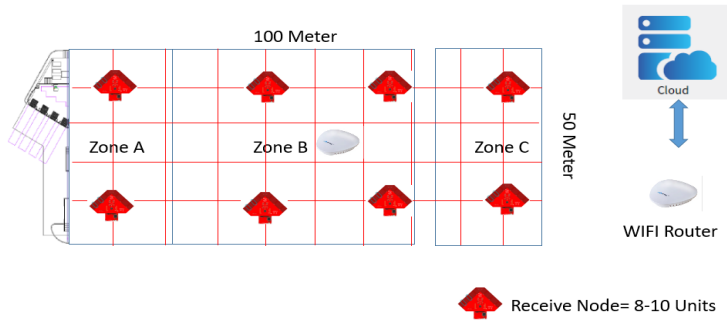


รูปที่ 2 แสดงภาพรวมของระบบการส่งข้อมูล



รูปที่ 3 ภาพรวมการออกแบบการทำงานของระบบสำหรับการส่งข้อมูล

RTLS Coverage Area : 1 Floor (5000 M²)



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์ Receive Node ในพื้นที่ 5000 ตารางเมตร (50*100 เมตร)

2.2 การวิเคราะห์และออกแบบซอฟต์แวร์

แนวคิดในการออกแบบระบบ (System Design) เป็นการออกแบบและสร้างระบบตามแนวความคิด เพื่อให้บรรลุเป้าหมายของระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร ซึ่งมีการออกแบบการทำงานของระบบตามการเข้าใช้งานของผู้ใช้ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ (1) Super User (ผู้ใช้ของสำนักงานใหญ่ ที่มีสิทธิสูงสุดในระบบ) (2) Administrator User (ผู้ดูแลระบบของแต่ละสถานที่) และ (3) General User (ผู้ใช้งานทั่วไป) โดยการทำงานสามารถอธิบายตามหน้าที่ของแต่ละประเภทของผู้ใช้ได้ดังนี้

Super User เป็นผู้ที่สามารถสร้างประเภทของอุปกรณ์ไว้ในระบบ เพื่อให้ Administrator นำประเภทของอุปกรณ์ไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ในสถานที่ของตนเอง และสร้าง Location ต่างๆ เพื่อเตรียม Assign ให้กับ Administrator ของแต่ละพื้นที่ (1 สถานที่: 1 Administrator) และสร้างผู้ใช้งานในระบบ

Administrator เป็นผู้ที่สามารถจัดการข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่ หลังจากที่ได้รับ Username และ Password มาแล้ว จะมีสิ่งที่สามารถจัดการได้ คือ การแก้ไขข้อมูลบางส่วนของสถานที่ของตนเองที่ตนเองรับผิดชอบ (1 สถานที่: 1 Administrator) ในส่วนนี้จะเป็นการเพิ่ม หรือ แก้ไข รูปภาพแผนที่ ข้อมูลพิกัดสถานที่ในแต่ละมุม (ที่คิดว่ามีความจำเป็นต่อการระบุกรอบของพื้นที่) นอกเหนือจากส่วนนี้จะเป็นการจัดการข้อมูลผู้ใช้งานภายใต้สถานที่ของตนเอง การจัดการอุปกรณ์ในสถานที่ของตนเอง และการดูข้อมูลของอุปกรณ์บนแผนที่

General User เป็นผู้ที่สามารถดูข้อมูลของอุปกรณ์ และข้อมูลอุปกรณ์บนแผนที่ของสถานที่ของตนเองได้เพียงเท่านั้น

รูปที่ 5 แสดง ER Diagram เป็นการออกแบบแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีการจัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูลของระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร ซึ่งจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของผู้ใช้งาน



ส่วนของอุปกรณ์ และส่วนของสถานที่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ส่วนของผู้ใช้งาน ในส่วนนี้จะมีที่เกี่ยวข้องก็คือ

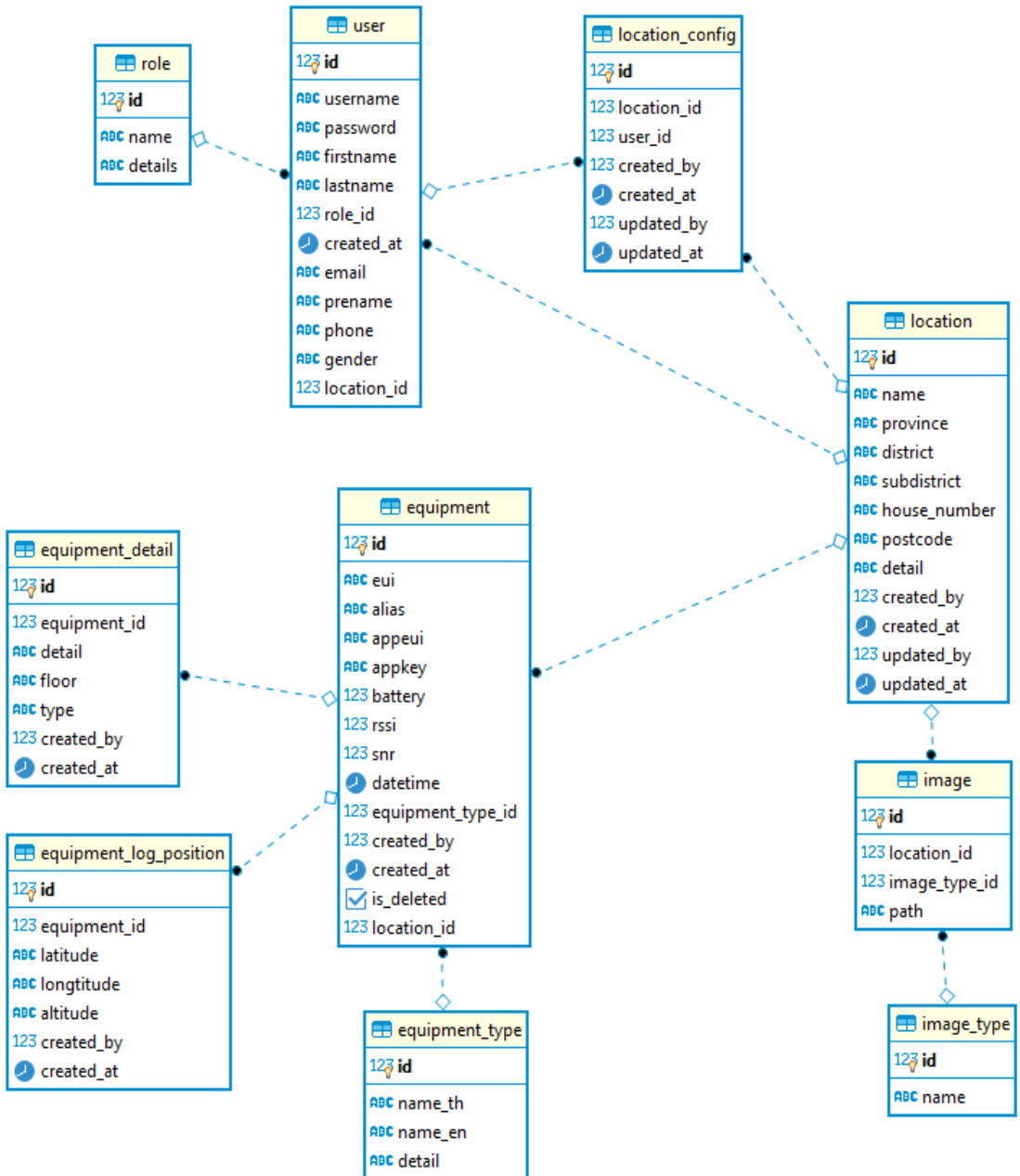
- Role จะใช้ในการเก็บประเภทของผู้ใช้ (User Type) ต่างๆ ที่เป็น Master Data
- User จะใช้ในการเก็บข้อมูลผู้ใช้งานส่วนของสถานที่ ในส่วนนี้จะมีที่เกี่ยวข้องก็คือ
- Location_config ใช้ในการระบุว่าสถานที่นี้ User Admin คนไหนเป็นคนดูแล
- Location ใช้ในการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่ง
- Image ใช้ในการเก็บรูปภาพของตำแหน่งนั้น
- Image_type ใช้ในการเก็บประเภทของรูปภาพส่วนของอุปกรณ์ ในส่วนนี้จะมีที่เกี่ยวข้องก็คือ
- Equipment ใช้ในการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์
- Equipment_type ใช้ในการเก็บประเภทของอุปกรณ์
- Equipment_detail ใช้ในการเก็บรายละเอียดของอุปกรณ์เพิ่มเติม
- Equipment_log_position ใช้ในการเก็บตำแหน่งของอุปกรณ์ในลักษณะของ Log

รูปที่ 6 แสดง Data Flow Diagram เป็นการออกแบบแผนภาพแสดงกระแสการไหลของข้อมูลที่มีอยู่ภายในระบบแบ่งกระบวนการทำงาน (Process) ออกเป็นทั้งหมด 5 กระบวนการ ได้แก่

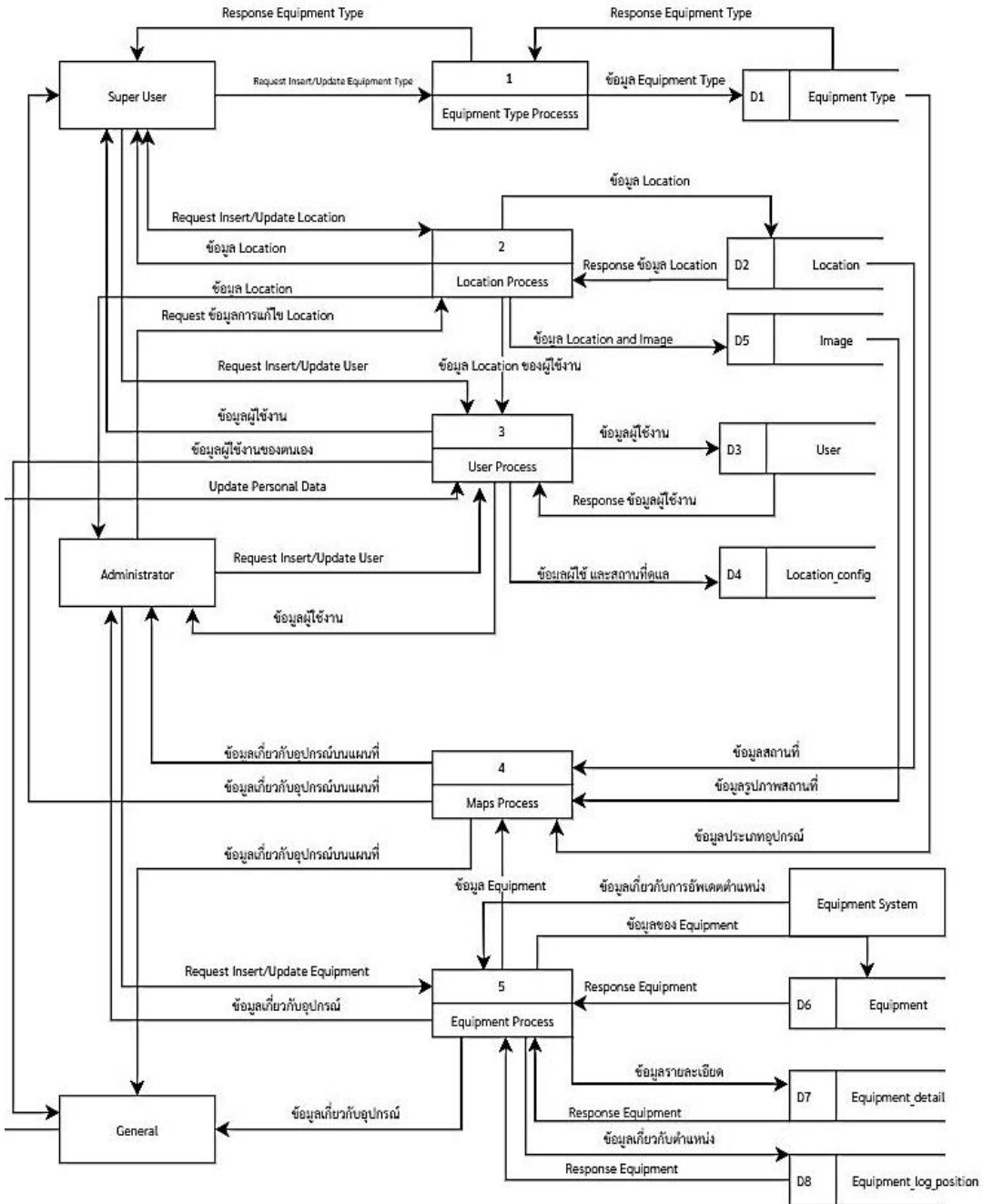
1. Equipment Type Process: เป็นกระบวนการที่มีหน้าที่หลักในการจัดการข้อมูลเกี่ยวกับ ประเภทของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีการติดต่อโดยตรงกับ Super User โดยมี การส่ง Request ที่ เกี่ยว กับ

Equipment Type เพื่อ เข้า Process และ รับ Response ส่งกลับมาให้กับผู้ใช้งาน โดยจะมีการติดต่อกับฐานข้อมูลในส่วนของ Table Equipment Type

2. Location Process: เป็นกระบวนการที่มีหน้าที่ในการจัดการกับการสร้างตำแหน่ง (Location) โดยจะมีการรับ Request เพื่อที่จะใช้ในการจัดการสถานที่ในส่วนต่างๆ เช่น การสร้าง และการแก้ไข เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ก็จะมีการ Response ค่าที่เกี่ยวกับ Location เพื่อใช้ในการสร้าง API ต่างๆ โดยจะมีการติดต่อกับฐานข้อมูลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสถานที่ คือ Location เป็นหลัก แต่จะมีการยุ่งเกี่ยว Location_config เพื่อที่ใช้ในการดูว่าในแต่ละสถานที่ที่มี Administrator คนใดดูแลรับผิดชอบอยู่
3. User Process: เป็นกระบวนการที่มีหน้าที่ในการสร้างผู้ใช้งาน และจัดการข้อมูลต่างๆ และยังมีหน้าที่จัดการการดูแลสถานที่ เพื่อที่จะได้รู้ว่าสถานที่ใดมี administrator ดูแลอยู่
4. Maps Process: เป็นกระบวนการที่มีหน้าที่ในการส่ง Response ข้อมูลที่ใช้ในการแสดงตำแหน่งของหมุดบนแผนที่ รวมไปถึงรายละเอียดต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้
5. Equipment Process: เป็นกระบวนการที่มีหน้าที่ในการจัดการอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงการรับข้อมูลตำแหน่งจากอุปกรณ์ เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูล



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล (ER-Diagram)



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงกระแสการไหลของข้อมูล (DFD Level 0)



2.3 การออกแบบเว็บแอปพลิเคชัน

การออกแบบเว็บแอปพลิเคชันในครั้งนี้ ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความต้องการที่จะมีฟังก์ชันเป็นสิ่งสำคัญ และเพื่อให้สามารถใช้งานได้ครบตามความต้องการ ส่วนที่สำคัญคือ การใช้งานและเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ จึงทำให้เกิด Mock up ของเว็บแอปพลิเคชันขึ้นมา เพื่อใช้เป็นรูปแบบการออกแบบหลักของแต่ละหน้า ดังนี้

2.3.1 หน้าเข้าสู่ระบบ (Login) โดยหน้าแรกจะเป็นการ Login เพื่อใช้งานระบบตามสิทธิของ User ที่ได้รับ เช่น Super User, Administrator หรือ General User ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 หน้าจอเข้าสู่ระบบ

2.3.2 เมนู Location เมนูย่อย Deployment ในแต่ละผู้ใช้งานสามารถใช้งานฟังก์ชันได้หลากหลายตาม แต่ละ Role ของผู้ใช้ที่จะสามารถใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบ Navbar ด้านซ้ายมือ เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลต่างๆ และใช้งานง่าย มีการแบ่งสัดส่วนให้ทางด้านขวามากกว่าทางด้านซ้าย เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยมีเมนูซ้ายเป็น Home, Location, Users, Equipment และ Upload Map ตามลำดับ รูปที่ 8 นั้นจะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการวางอุปกรณ์ภายในระบบ ซึ่งจะมีตำแหน่งการวางตัวอุปกรณ์ Receive Node และ อุปกรณ์

Access Point แบบ WIFI เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณโดยในครั้งแรกทางผู้ดูแลระบบ Administrator จะเป็นผู้กำหนดค่าติดตั้งเพื่อให้ทางผู้ใช้ General User ได้ใช้งานอย่างสะดวก

2.3.3 เมนู Location สำหรับโรงพยาบาล ซึ่งเป็นการติดตามตำแหน่งอุปกรณ์ที่ต้องการค้นหาแบบเรียลไทม์ โดยจะมีการกำหนดสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ Tag ไว้ในแต่ละประเภท ตาม Icon Symbol บนแผนที่ ยกตัวอย่างกรณี ในโรงพยาบาลจะปรากฏแผนที่ในชั้นที่ 1 ซึ่งจะมีอุปกรณ์ Wheel Chair 001, 002 ใน Zone A และ 101 ใน Zone B นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ Stretcher 001, 002 ใน Zone B และ Zone C ตามลำดับ ส่วนอุปกรณ์ IV Pump 010, 001 จะอยู่ใน Zone B และ 005 จะอยู่ใน Zone C ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถช่วยให้บุคลากรในโรงพยาบาลสามารถติดตามตำแหน่งปัจจุบันของอุปกรณ์แต่ละประเภท และแต่ละหมายเลขได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 9

2.3.4 เมนู Location สำหรับ โรงงาน หรือ คลังสินค้า ซึ่งเป็นการติดตามตำแหน่งอุปกรณ์ที่ต้องการค้นหาแบบเรียลไทม์ โดยจะมีการกำหนดสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ Tag ไว้ในแต่ละประเภท ตาม Icon Symbol บนแผนที่ ยกตัวอย่างกรณี ในคลังข้อมูล จะปรากฏแผนที่ในชั้นที่ 1 ซึ่งจะมีอุปกรณ์ Pallet 001 ใน Zone A 011 ใน Zone B และ 101 ใน Zone C นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ Trolley 001, 011 ใน Zone B ส่วนอุปกรณ์ Forklift 001, 002 จะอยู่ใน Zone B และ 003 จะอยู่ใน Zone C ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถช่วยในบุคลากรใน คลังข้อมูลสามารถติดตามตำแหน่งปัจจุบันของอุปกรณ์แต่ละประเภทและแต่ละหมายเลขได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 10



อุปกรณ์ทั้งหมด

ค้นหา											
Eui	Alias	Appkey	AppId	Battery	Rssi	Src	Detail	Floor	Type	จัดการ	
F8.BA.SE.2D.8B.D3	เปลนอนหมายเลข 1	-	-	100	0	0	ตัว slave	4	อุปกรณ์ Tag	/	
F8.BA.SE.2D.8B.F5	เปลนอนหมายเลข 2	-	-	100	0	0	-	4	อุปกรณ์ Tag	/	
F8.BA.SE.2D.8A.CE	เปลนอนหมายเลข 3	-	-	100	0	0	-	4	อุปกรณ์ Tag	/	
F8.BA.SE.2D.8C.94	เปลนอนหมายเลข 4	-	-	100	0	0	-	4	อุปกรณ์ Tag	/	
F8.BA.SE.2D.83.B3	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 1	-	-	100	0	0	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	4	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	/	
F8.BA.SE.2D.8B.D1	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 2	-	-	100	0	0	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	4	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	/	
F8.BA.SE.2D.89.BB	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 3	-	-	100	0	0	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	4	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	/	
F8.BA.SE.2D.7D.DD	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 4	-	-	100	0	0	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	4	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	/	
F8.BA.SE.2D.8C.CE	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 5	-	-	100	0	0	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	4	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	/	
8D.6F.8D.EE.99.FD	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 6	-	-	100	0	0	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	4	อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	/	

Rows per page: 10 1-10 of 15

รูปที่ 8 หน้าจอเมนู Location เมนูย่อย Deployment

Indoor Location Tracking

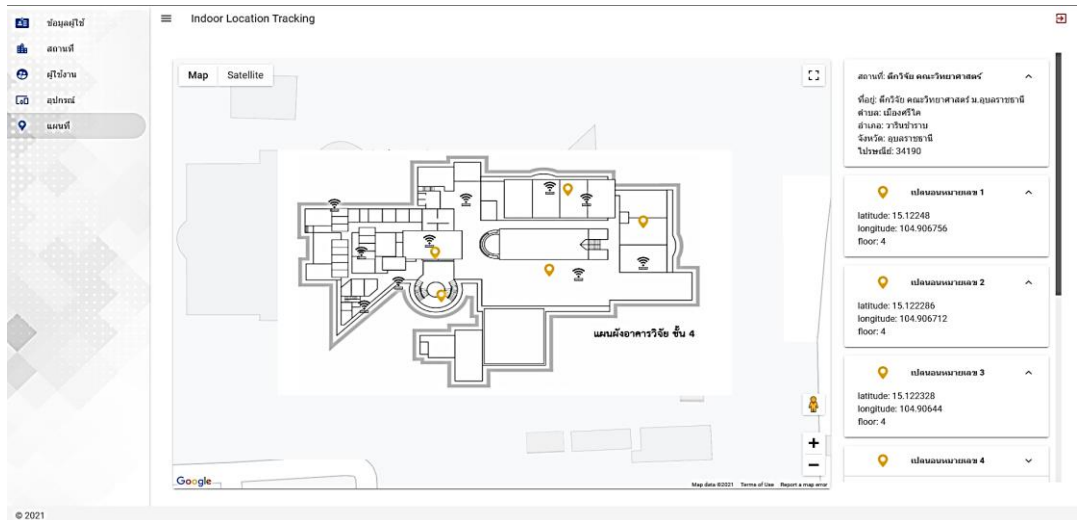
Map Satellite

แผนที่อาคารวิจัย ชั้น 4

สถานะ: ศึกษวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ ม.อุบลราชธานี
 ที่อยู่: ศึกษวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ ม.อุบลราชธานี
 ตำบล: วรเขื่อนวิบูลย์
 อำเภอ: วรเขื่อนวิบูลย์
 จังหวัด: อุบลราชธานี
 ไปรษณีย์: 34190

- เปลนอนหมายเลข 1
- เปลนอนหมายเลข 2
- เปลนอนหมายเลข 3
- เปลนอนหมายเลข 4
- เปลนอนหมายเลข 5
- อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 1
- อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 2
- อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 3
- อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 4
- อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง 5

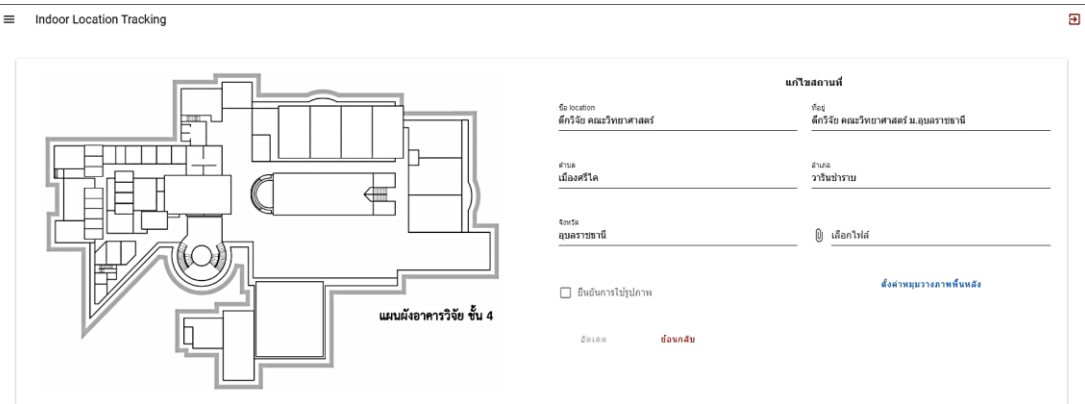
รูปที่ 9 หน้าจอเมนู Location สำหรับโรงพยาบาล



รูปที่ 10 หน้าจอเมนู Location สำหรับคลังสินค้า

2.3.5 เมนู Upload Map สามารถเลือกภาพ Layout สถานที่ เช่น โรงพยาบาล โรงงาน หรือคลังสินค้าใน Format.jpg, png ในขนาดที่เป็น Scale จริง เช่น 1:100 เพื่อให้สามารถค้นหาอุปกรณ์

ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งปรกติทางโรงพยาบาล โรงงาน หรือคลังสินค้า ส่วนใหญ่จะมีแบบแปลนอยู่แล้ว ทำให้สามารถสะดวกในการเพิ่มข้อมูลลงไปในระบบดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 หน้าจอเมนู Upload Map

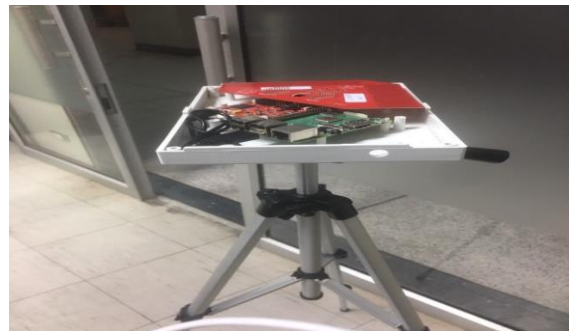


3. ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

หลังจากที่ดำเนินการพัฒนาระบบทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เรียบร้อยแล้ว คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบการทำงานร่วมกันของฮาร์ดแวร์ร่วมกับซอฟต์แวร์ในห้องปฏิบัติการโดยการทดลองต่อโหนดอ้างอิงและโหนดประมวลผลจำนวน 3 ตัว ดังรูปที่ 12-14 ซึ่งได้ทำการเชื่อมต่อสัญญาณ WIFI ไปยัง WIFI Router ที่ต่ออยู่กับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต 3G จากนั้นได้ทำการทดสอบโหนดวัตถุตั้งรูปที่ 15 พบว่าโหนดอ้างอิงและโหนดประมวลผลทั้ง 3 ตัวสามารถส่งต่อข้อมูลไปยังฐานข้อมูลที่อยู่บนคลาวด์ของ Microsoft Azure ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ และสามารถบันทึกข้อมูลมุมที่ส่งมายังฐานข้อมูลตั้งรูปที่ 16 เพื่อใช้ประมวลผลตำแหน่งของโหนดวัตถุและแสดงผลผ่านทางหน้าจอได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 13 โหนดอ้างอิงและโหนดประมวลผล 2



รูปที่ 14 โหนดอ้างอิงและโหนดประมวลผล 3



รูปที่ 12 โหนดอ้างอิงและโหนดประมวลผล 1



รูปที่ 15 โหนดวัตถุที่ใช้ทดสอบ



บทความวิจัย

id	child_baddress	parent_baddress	rssi	angle	created_by	created_at
753	80:6F:B0:EE:AE:A0	F8:8A:5E:2D:8B:D1	-45	-5	0	2021-02-24 11:1
754	80:6F:B0:EE:AE:A0	F8:8A:5E:2D:8B:D1	-80	16	0	2021-02-24 11:2
755	80:6F:B0:EE:AE:A0	F8:8A:5E:2D:89:BB	-74	44	0	2021-02-24 11:2
756	80:6F:B0:EE:AE:A0	F8:8A:5E:2D:89:BB	-74	40	0	2021-02-24 11:2
757	80:6F:B0:EE:AE:A0	F8:8A:5E:2D:89:BB	-73	38	0	2021-02-24 11:2
758	80:6F:B0:EE:AE:A0	F8:8A:5E:2D:8B:D1	-84	61	0	2021-02-24 11:2

รูปที่ 16 ตัวอย่างข้อมูลที่บันทึกในฐานข้อมูล

```

AOAS Logs
AOAS > Master : <RTLSNode(M2 Master, started 1915745376)>
AOAS > Passives : []
AOAS > All : [RTLSNode(M2 Master, started 1915745376)]
AOAS > Devices Reset
AOAS > Start scan for 5 sec
AOAS > Scan Results: [{"addr": "80:6F:B0:EE:AE:A0", "addrType": 0, "rs
AOAS > Connected to : [{"addr": "80:6F:B0:EE:AE:A0", "addrType": 0, rs
AOAS > AoA paramas set for connection handle: 0
AOAS > AoA Callback Set for All Connection Handlers
AOAS > AoA started with connection handle: 0
AOAS > Going to sleep for 2 sec
AOAS > 80:6F:B0:EE:AE:A0
AOAS > 0
AOAS > 80:6F:B0:EE:AE:A0
AOAS > 1
AOAS > 80:6F:B0:EE:AE:A0
AOAS > 2
AOAS > 80:6F:B0:EE:AE:A0
AOAS > 3
AOAS > 80:6F:B0:EE:AE:A0
AOAS > 4
AOAS > Try to stop AOAS result parsing thread
AOAS > AOAS Stopped
AOAS > Master Disconnected
AOAS > Done
AOAS > Wait 5 sec

Custom Metrics
Metadata
App Name AOAS
Namespace default
Version N/A
Restarts 0
Uptime 23m
Script path /home/pi/Desktop/AOASanner/AOA_scanner.py
Interpreter N/A
Interpreter args python3
Exec mode N/A
Node.js version undef
watch & reload 0
Unstable restarts N/A
Comment N/A

```

รูปที่ 17 ตัวอย่างการตรวจสอบการส่งต่อข้อมูลจากโหนดอ้างอิงและโหนดประมวลผลไปยังฐานข้อมูล



4. ผลการดำเนินงาน

คณะผู้วิจัยได้ทำการนำระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร (Indoor Location Tracking) ของเครื่องมือ อุปกรณ์ ของใช้ และคน สำหรับโรงพยาบาล และสำหรับในโรงงาน (Factory) หรือในคลังสินค้า (Warehouse) เพื่อใช้ในการติดตามสถานะของอุปกรณ์เคลื่อนย้ายสินค้าคงคลัง (Material Handling) สินค้าคงคลัง (Inventory) หรือวัตถุดิบ (Raw Material) หรือ สินค้าสำเร็จรูป (Finished Goods) หรือเครื่องมืออุปกรณ์ (Tool) ต่าง ๆ ไปทำการทดสอบการใช้งานระบบกับกลุ่มเป้าหมายจำนวน 10 แห่ง และทำการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารฯ ให้กับเจ้าหน้าที่ของโรงพยาบาลและโรงงาน หรือคลังสินค้ากลุ่มเป้าหมาย จำนวน 10 แห่ง ไม่น้อยกว่า 20 คน สามารถสรุปผลการติดตั้ง การทดสอบ และการจัดอบรมการใช้งานระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตรได้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 18 แสดงจุดติดตั้งอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง Received Node ของโรงพยาบาลมะเร็ง

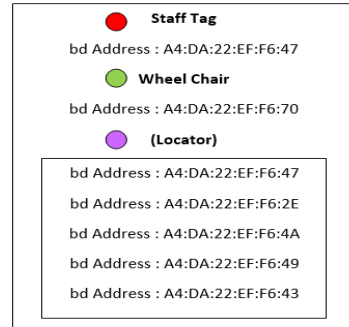
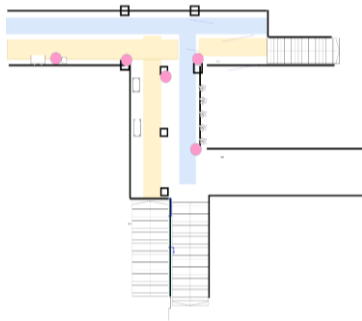
4.1 ตัวอย่างผลการติดตั้งระบบของ โรงพยาบาลมะเร็ง

ภาพถ่ายจุดติดตั้งอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง Received Node หรือ Locator จำนวน 5 ตัว ในบริเวณพื้นที่ทดสอบโดยจะติดตั้งบนเสาสูง 2.5 เมตร ที่ได้เตรียมมาเพื่อให้เกิดความสะดวกในการติดตั้งและขนย้าย ดังรูปที่ 18

เนื่องจากทางโรงพยาบาลมะเร็ง ไม่มีผังภาพ (Floor Plan) ดังนั้นทางคณะผู้วิจัย จึงได้วาดรูปแผนที่ด้วยโปรแกรม draw.io เพื่อใช้ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

Floor Plan ของพื้นที่ทดสอบเป็นทางเชื่อมระหว่างตึกชั้น 2 อาคาร อุบัติเหตุแผนที่บริเวณพื้นที่ทดสอบพร้อมจุดติดตั้งอุปกรณ์ Locator ตำแหน่ง สีชมพู ดังรูปที่ 19 และ ID อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง Received Node หรือ Locator และ Tag ดังรูปที่ 20





รูปที่ 19 แสดงแผนที่ทดสอบพร้อมจุดติดตั้งอุปกรณ์ของโรงพยาบาลมะการักษ์

รูปที่ 20 แสดง ID อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง Received Node ของโรงพยาบาลมะการักษ์

ภาพถ่ายแสดงการทดสอบตำแหน่งของรถเข็น Wheel Chair เคลื่อนที่ไปยังจุดทดสอบที่ 1 ระยะทาง ตำแหน่งรถเข็น Wheel Chair กับเสาจุดที่ 1 ประมาณ 0.731 เมตร ดังรูปที่ 21

ภาพถ่ายแสดงการทดสอบตำแหน่งของรถเข็น Wheel Chair เคลื่อนที่ไปยังจุดทดสอบที่ 2 ระยะทาง ตำแหน่งรถเข็น Wheel Chair กับระยะจุดที่ 2 ประมาณ 1.2 เมตร ดังรูปที่ 22



รูปที่ 21 แสดงการทดสอบการเคลื่อนย้ายตำแหน่งรถเข็น Wheel Chair กับระยะจุดที่ 1 ของโรงพยาบาลมะการักษ์



รูปที่ 22 แสดงการทดสอบการเคลื่อนย้ายตำแหน่งรถเข็น Wheel Chair กับระยะจุดที่ 2 ของโรงพยาบาลมะการักษ์



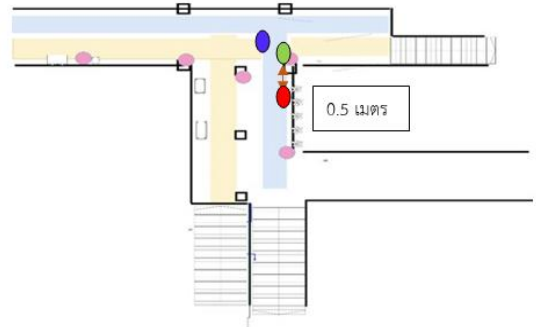
4.2 ตัวอย่างผลการทดสอบการใช้งานระบบของโรงพยาบาลมะเร็ง

ผลการทดสอบตำแหน่งของรถเข็น Wheel Chair จุดตรวจสอบที่ 1 ของโรงพยาบาลมะเร็ง ผลการทดสอบระยะในโปรแกรมสัญลักษณ์วงกลมสีเขียว หมายถึง TAG ที่แทนตำแหน่งรถเข็น ตำแหน่งรถเข็นอยู่ใกล้กับเสาทางด้านขวาหรือ อุปกรณ์ระบุตำแหน่ง Received Node หรือ Locator ตัวที่ 1 สีชมพู ทางขวา ในโปรแกรม 1 Block สีเหลี่ยมจตุรัสจะแทนค่าประมาณ 1 เมตร ตำแหน่งจุดสีเขียวในโปรแกรมมีระยะห่างจากเสาประมาณ 1.5 เมตร

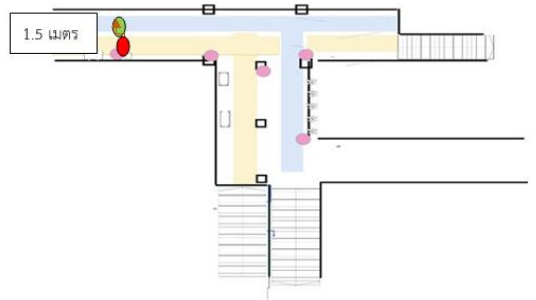
ผลการเปรียบเทียบระยะจากการวัดกับระยะในโปรแกรมเปรียบเทียบระยะห่างของ TAG จากรูปแรกทางด้านซ้ายกับระยะจริง 80 ซม. เปรียบเทียบระยะห่างของ TAG จากผลการทดสอบระยะในโปรแกรม ทาง TAG มีระยะ 50 ซม. ระยะที่คลาดเคลื่อน 30 ซม. ดังรูปที่ 23

ผลการทดสอบตำแหน่งของรถเข็น Wheel Chair จุดตรวจสอบที่ 2 ของโรงพยาบาลมะเร็ง ผลการทดสอบระยะในโปรแกรม สัญลักษณ์วงกลมสีแดง หมายถึง TAG ที่แทนตำแหน่งรถเข็น วงกลมสีแดงแสดงตำแหน่งคนเข็นรถ ตำแหน่งรถเข็นอยู่ใกล้กับอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง Received Node หรือ Locator สีชมพูมีระยะประมาณ 1.5 เมตร

ผลการเปรียบเทียบระยะจากการวัดกับระยะในโปรแกรม เปรียบเทียบระยะห่างของ TAG สีเขียว จากรูปแรกทางด้านซ้ายกับระยะจริง 120 ซม. เปรียบเทียบระยะห่างของ TAG จากผลการทดสอบระยะในโปรแกรม ทาง TAG ด้านขวาห่างกับระยะจริง 150 ซม. ระยะที่คลาดเคลื่อน 30 ซม. ดังรูปที่ 24



รูปที่ 23 แสดงผลการทดสอบที่ 1 ระยะในโปรแกรมของโรงพยาบาลมะเร็ง



รูปที่ 24 แสดงผลการทดสอบที่ 1 ระยะในโปรแกรมของโรงพยาบาลมะเร็ง

ผลความคลาดเคลื่อนจากสถานที่ทำการทดสอบจริง และผลการประเมินความพึงพอใจแสดงดังตารางที่ 1 และ 2

4.3 ผลการจัดอบรมการใช้งานระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร

สรุปผลการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารฯ ให้กับเจ้าหน้าที่ของโรงพยาบาลและโรงงาน หรือคลังสินค้า คณะผู้วิจัยได้จัดทำแบบประเมินการทดสอบระบบและจัดอบรม



ให้กับเจ้าหน้าที่ของโรงพยาบาลและโรงงาน หรือ คลังสินค้า โดยประกอบด้วยหัวข้อการประเมินจำนวน 7 หัวข้อ ประกอบด้วย การติดตั้งระบบสำหรับการใช้งาน การตั้งค่าระบบโดยผู้ดูแลระบบ การใช้งานระบบ โดยผู้ใช้ทั่วไป การใช้งานแผนที่บอกตำแหน่งของ อุปกรณ์ การติดตามอุปกรณ์ Tag กับอุปกรณ์ใน โรงพยาบาล ความถูกต้องแม่นยำในการบอกตำแหน่ง และระดับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ผลการ

ประเมินความพึงพอใจในการอบรมใช้ระดับความพึงพอใจในรูปแบบ 5 ระดับ จำแนกเป็น ระดับดีมาก (4.01–5.00) ระดับดี (3.01-4.00) ระดับปานกลาง (2.01-3.00) ระดับพอใช้ (1.01-2.00) ระดับต้องปรับปรุง (0.00-1.00) พบว่า ภาพรวมการจัดอบรมในทุกมิติมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.64 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.36 อยู่ในระดับดี

ตารางที่ 1 ผลความคลาดเคลื่อนจากสถานที่ทำการทดสอบจริง

ชื่อ	จุดทดสอบที่ 1 (หน่วย: เซนติเมตร)	จุดทดสอบที่ 2 (หน่วย: เซนติเมตร)
บริษัท แนคคร่า ไมโครเทค จำกัด	60	40
บริษัท ปราโมทย์ การเกษตร จำกัด	50	0
บริษัท พนภันท์ ซัพพลาย จำกัด	27	72.6
บริษัท PRT Logistics จำกัด	100	84
หจก.ชาวมุกิจกามูจน์ (CKK)	68	9
บริษัท EPCO จำกัด	40	48
หจก.วีเอสโลดดิ้ง	173	80
กองสาธารณสุข ต.วังศาลา	73	15
โรงพยาบาลมะการักษ์	30	30
โรงพยาบาลรามคำแหง	50	27
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน	67.1	40.5

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ

ลำดับ	ข้อความถาม	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	การติดตั้งระบบสำหรับการใช้งาน	4.00	0.00
2	การตั้งค่าระบบโดยผู้ดูแลระบบ	3.20	0.92
3	การใช้งานระบบโดยผู้ใช้ทั่วไป	4.00	0.47
4	การใช้งานแผนที่บอกตำแหน่งของอุปกรณ์	4.00	0.00
5	การติดตามอุปกรณ์ Tag กับอุปกรณ์ในโรงพยาบาล	3.90	0.32
6	ความถูกต้องแม่นยำในการบอกตำแหน่ง	3.20	0.42
7	ระดับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น	3.20	0.42
	ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน	3.64	0.36



5. สรุปผลการดำเนินงาน

ระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร เป็นโครงการที่จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาต้นแบบระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารของ วัสดุเครื่องมือ อุปกรณ์ ของใช้ พนักงาน และผู้ป่วยที่มีการนำออกไปนอกพื้นที่หรือถูกขโมยแบบเรียลไทม์ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตรจำนวน 1 ระบบ โดยระบบจะประกอบด้วยส่วนที่ 1) ฮาร์ดแวร์สำหรับใช้ในระบบฯ จำนวน 1 ชุด และส่วนที่ 2) ซอฟต์แวร์ระบบฯ ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์จะมีตัวรับสัญญาณ (Receive Node) ที่จะต้องนำไปติดตั้งให้ครอบคลุมบริเวณพื้นที่หรือห้องต่าง ๆ ในบริเวณอาคาร จะมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 6 หน่วย โดยพิจารณาถึงระดับสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการค้นหา ส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ระบบฯ จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น การแสดงผลทางแผนที่ (Map) เพื่อใช้ในการค้นหา และส่วนที่เป็น การจัดการอุปกรณ์ ฮาร์ดแวร์ (Administration) โดยหลังจากที่ได้มีการพัฒนาระบบฯ เรียบร้อยแล้วจะมีการนำระบบฯ ที่ได้ไปทำการทดสอบการใช้งานกับโรงพยาบาล และโรงงาน หรือ คลังสินค้า จำนวน 10 แห่ง โดยมีผลทดสอบค่าเฉลี่ยระยะคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างจริงกับโปรแกรม ณ จุดทดสอบที่ 1 และจุดทดสอบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 67.1 เซนติเมตร และ 40.5 เซนติเมตร ตามลำดับ และได้ทำการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารฯ ให้กับเจ้าหน้าที่ของโรงพยาบาลและโรงงาน หรือคลังสินค้า จำนวน 10 แห่ง ไม่น้อยกว่า 20 คน ซึ่งสามารถสรุปผลภาพรวมการจัดอบรมในทุกมิติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.64 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.36 อยู่ใน

ระดับดี จากนั้นนำระบบระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตรไปทำการทดสอบมาตรฐานด้าน ความปลอดภัย (Safety), สภาพแวดล้อมและอุณหภูมิ (Environment and Temperature) และ การแผ่รังสี (Electromagnetic Wave) โดยผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สามารถนำไปใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

6. ข้อเสนอแนะ

ความแม่นยำของระบบขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม หน่วยงาน เช่น พื้นที่โล่ง หรือ พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางสัญญาณ ซึ่งในการวิจัยนี้ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงประเด็นในส่วนนี้แต่จะมีการปรับปรุงในอนาคตต่อไป

นอกเหนือจากนี้การทดสอบมาตรฐานส่วนที่เป็นเรื่องสภาพแวดล้อมในส่วนย่อยของการป้องกัน (Protection) นั้นยังไม่ได้ครอบคลุมถึงกล่องเคสที่ใส่ให้มีมาตรฐาน ซึ่งจะมีการปรับปรุงในอนาคต เช่น แนวทางพัฒนาในเชิงพาณิชย์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนพัฒนาดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม ที่ให้การส่งเสริมและสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานโครงการระบบติดตามตำแหน่งภายในอาคารแบบเรียลไทม์ระดับเซนติเมตร

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-direction-finding/>. (Accessed on 29 June 2021)



- [2] Y. Hou, X. Yang and Q. H. Abbasi, Efficient AOA-based wireless indoor localization for hospital outpatients using mobile devices, *Sensors*, 2018, 18(11), 3698.
- [3] J. Hightower, G. Borriello and R. Want SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength, *UW CSE Technical Reports*, 2000, 1-16.
- [4] X. Hou, T. Arslan, J. Gu, Indoor localization for bluetooth low energy using wavelet and smoothing filter, 2017 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), *Proceeding*, 2017, 1-6.
- [5] X. Hou, T. Arslan, A. Juri and F. Wang, Indoor localization for bluetooth low energy devices using weighted off-set triangulation algorithm, *The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+2016)*, *Proceeding*, 2016, 2286-2292.
- [6] V. Almula and D. Cheng, Bluetooth triangulator, University of California, USA. <https://cseweb.ucsd.edu/classes/fa06/cse237a/finalproj/almula.pdf>
(Accessed on 15 December 2022)
- [7] B. Jachimczyk, D. Dziak and W.J. Kulesza, Using the fingerprinting method to customize RTLS based on the AOA ranging technique, *Sensors* 2016, 16, 876.
- [8] T. de Haan, BLE localization using switched-beam angle of arrival for pallet localization in warehouses, Thesis, University of Twente, Netherlands, 2018.
- [9] C. Yaqin, Evaluating off-the-shelf hardware for indoor positioning, Thesis, Lund University, Sweden, 2017.
- [10] M.N.K. Boulos and G. Berry, Real-time locating systems (RTLS) in healthcare: a condensed primer, *International Journal of Health Geographics*, 2012, 11, 25.
- [11] F. Halawa, H. Dauod, I.G. Lee, Y. Li, S.W. Yoon and S.H. Chung, Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency, *International Journal of Production Economics*, 2020, 224, 107541.
- [12] B. Tatham, and T. Kunz, Anchor node placement for localization in wireless sensor networks, *IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, *Proceeding*, 2011, 180–187.



การเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนในการเพาะปลูกหน่อไม้ฝรั่งด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

สิริวิช ทัดสวน¹ และ ภาณุวัฒน์ แตระกุล^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

² สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: panuwatt@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 6 พฤษภาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มิถุนายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 27 กรกฎาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างระบบการบริหารจัดการน้ำในไร่หน่อไม้ฝรั่งบนพื้นที่ 6,760 ตารางเมตร ด้วยระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนรวมถึงป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากน้ำท่วมภายในไร่หน่อไม้ฝรั่ง โดยมีขั้นตอนการทำงานคือใช้ตัวรับรู้ความชื้นดิน ตัวรับรู้ความชื้นและอุณหภูมิแวดล้อม ตัวรับรู้น้ำฝน ตัวรับรู้ความเร็วลม การออกแบบและสร้างชุดควบคุมการทำงานปั้มน้ำบ่อบาดาล สร้างชุดควบคุมการทำงานปั้มน้ำระบายน้ำฝนทิ้ง สร้างชุดจ่ายน้ำระบบสปริงเกอร์ ออกแบบระบบการส่งน้ำเข้าภายในพื้นที่บริเวณไร่หน่อไม้ฝรั่งด้วยท่อ PVC จากนั้นออกแบบและเขียนโปรแกรม Arduino IDE เพื่อติดต่อกับโมดูลเอ็มซียู ESP8266 ที่มีชิป WiFi คลื่นความถี่ 2.4 GHz ผังด้านเน็ตเวิร์กใช้คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของเน็ตพายเป็นตัวควบคุม แสดงผล (แดชบอร์ดและพีดี) และเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อให้เกษตรกรทราบข้อมูลได้อย่างทันทีทันใด ผลลัพธ์จากการเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลา 60 วัน ทำให้ทราบว่าระบบการให้น้ำภายในไร่หน่อไม้ฝรั่งให้มีความชื้นอย่างสม่ำเสมอด้วยระบบการสปริงเกอร์ที่ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นตัวควบคุมให้ผลผลิตมากกว่าการให้น้ำแบบปล่อยน้ำไหลตามร่องในพื้นที่ทดสอบวิธีการละ 1 ไร่เท่าๆ กัน เมื่อเสร็จแล้วไปคำนวณเทียบกับพื้นที่จริงที่ 4.22 ไร่ เทียบผลผลิต 4 รอบ กรณีดีที่สุดการใช้ระบบ IoT สามารถให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 12.8% ลดต้นทุน 99,246 บาท/ปีและใช้ระยะเวลาการคืนทุนเพียง 1.04 ปีเท่านั้น

คำสำคัญ: หน่อไม้ฝรั่ง; อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง; โมดูลเอ็มซียู ESP8266; เน็ตพาย

Increasing Yield and Reducing the Cost of Cultivation of Asparagus with the Internet of Things

Siriwich Tadsuan¹ and Panuwat Taerakul^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University

² Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University

* Corresponding author, E-mail: panuwatt@sau.ac.th

Received: 6 May 2022; Revised: 20 June 2022; Accepted: 27 July 2022

Online Published: 15 December 2022

Abstract: This research is the designing and constructing of a watering management system on a 6,760 square meter asparagus farming area using the Internet of Things approach to increase productivity, reduce cost, and prevent flooding as well. Processes in this study include utilizing multiple sensors such as soil moisture sensor, ambient humidity and temperature sensor, rainfall sensor and wind speed sensor, designing and developing a groundwater pump control system, a rainfall drainage pump control system, a water distribution control for a sprinkler system, and a plumbing system on the farm area using PVC pipe. In addition, there is also the creation and development of an Arduino IDE script for communicating with the microcontroller, Node MCU ESP8266, with a 2.4 GHz WiFi chip. A NETPIE Cloud Server is utilized for controlling and displaying (Dashboard and Feed) multiple data to simultaneously inform farmers. In conclusion, results from 60 days of data collection suggest that the asparagus watering system which can regulate soil moisture using a sprinkler process controlled by the Internet of Things can promote more productivity than that of the conventional system on the same plantation area of 1 Rai. Of this result, in comparison with the real plantation area by scaling up to 4.22 Rai with a production of 4 crops per year, the calculation shows that the best practice of the IoT system can increase productivity by 12.8% and reduce cost by 99,246 baht per year implying that the return period is only 1.04 year.

Keywords: Asparagus; Internet of Things; Node MCU ESP8266; NETPIE



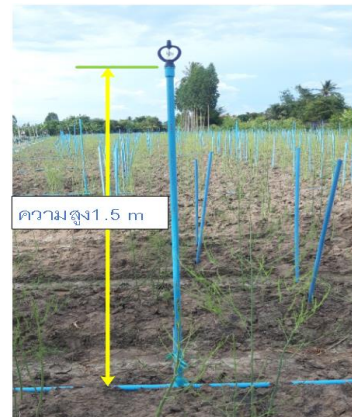
1. บทนำ

หน่อไม้ฝรั่งอุดมไปด้วยสารอาหารหลากหลายชนิด ถึงขนาดในวันที่ 24 พฤษภาคม ของทุกๆ ปี จัดให้เป็น วันเฉลิมฉลองวันหน่อไม้ฝรั่งแห่งชาติของประเทศ สหรัฐอเมริกา [1] ดังนั้น การดูแลรักษา [2] และการพัฒนาด้านการเก็บเกี่ยวผลผลิตจึงเป็นเรื่องสำคัญเป็นอย่างมาก [3-4] ในส่วนของการบริหารจัดการน้ำ [5] ได้ออกแบบใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการให้พลังงานกับปั๊มน้ำที่ใช้จ่ายน้ำในไร่หน่อไม้ฝรั่ง โดยได้แสดงผลจากการทดสอบการใช้พลังงานในแต่ละเดือน ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกัน และจาก [6] ได้มีการแนะนำควรให้น้ำที่ผิวหน้าดินชั้นน้อยทำให้เปียกแฉะ แต่ถ้าให้น้ำน้อยเกินไปดินจะแห้ง จะทำให้ต้นหน่อไม้ฝรั่งมีเส้นใยมากหน่อจะเหี่ยวทำให้คุณภาพด้อยลง ในการให้น้ำแบ่งได้ 3 ประเภท (1) ใช้เรือกดน้ำไปตามร่องน้ำ (2) ใช้วิธีเปิดน้ำให้ไหลในร่องระบายน้ำข้างแถวปลูกดังรูปที่ 1 และ (3) ใช้ระบบสปริงเกอร์แสดงดังรูปที่ 2

ณ ปัจจุบันได้มีการใช้ระบบควบคุมและติดตามด้วยระบบ IoT ในงานเกษตรอย่างแพร่หลาย [7] โดยให้ความสำคัญกับเรื่องการควบคุมและติดตามน้ำมากถึง 23% [8] จากข้อมูลอ้างอิง [9] ใช้ระบบน้ำหยดกับไร่หน่อไม้ฝรั่งที่มีพื้นที่ทุ่งโล่งขนาดใหญ่ โดยควบคุมระบบปั๊มน้ำระยะไกลในไร่หน่อไม้ฝรั่งของบริษัท AT&T ซึ่งผลที่ได้ทำให้สามารถประหยัดปริมาณการใช้น้ำลงได้ ข้อมูลอ้างอิง [10] ได้มีการใช้ระบบ IoT มาช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการให้น้ำของหน่อไม้ฝรั่ง ข้อมูลอ้างอิง [11] ได้เปรียบเทียบระบบการให้น้ำกับไร่หน่อไม้ฝรั่งแบบสปริงเกอร์ มีแนวโน้มการให้ผลผลิตที่ดีกว่าระบบน้ำหยด แต่ในการ



รูปที่ 1 การให้น้ำโดยเปิดน้ำให้ไหลตามร่องระบายน้ำ



รูปที่ 2 การให้น้ำโดยใช้ระบบสปริงเกอร์

เปรียบเทียบการให้น้ำแบบใช้วิธีเปิดน้ำให้ไหลในร่องระบายน้ำข้างแถวปลูกเทียบกับใช้ระบบสปริงเกอร์ที่สามารถควบคุมแบบทางไกลด้วย IoT นั้นยังไม่มีการทำวิจัย ซึ่งจุดนี้มีความสำคัญในด้านการตัดสินใจในเรื่องการบริหารจัดการน้ำภายในไร่เป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาค่าการลงทุน ค่าประหยัด และระยะเวลาการคืนทุนจากการเปรียบเทียบทั้งสองกรณี ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจลงทุนเพื่อพัฒนาระบบการจัดการน้ำภายในไร่ได้เป็นอย่างดี



2. การดำเนินงานวิจัย

ไร้หน่อไม้ฝรั่งที่มีอายุ 6 ปีเป็นกรณีศึกษา มีพื้นที่ 4.22 ไร่ ถ้าผลการวิจัยผลน่าพึงพอใจแสดงว่าสามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์กับพื้นที่ขนาดเท่ากันหรือน้อยกว่าได้ เนื่องจากที่ดำเนินงานได้แก่ ติดตั้งระบบการส่งน้ำและจ่ายน้ำด้วยสปริงเกอร์ ระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังภายในไร่ วงจรควบคุมมอเตอร์วาล์วน้ำ การวัดความชื้นดิน วัดอุณหภูมิอากาศ ความชื้นอากาศ ความเร็วลม และดูเสถียรภาพการทำงานของ Node MCU ESP8266 และการสื่อสารด้วยสัญญาณ WiFi กับเราเตอร์อินเทอร์เน็ตบ้านว่ารองรับกับงานที่มี I/O พอร์ตมากๆ ได้หรือไม่

ในส่วนเฉพาะเรื่องของการหาปริมาณผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้จากวิธีการให้น้ำที่แตกต่างกัน จะแยกใช้พื้นที่ทำวิจัยจำนวนแค่ 2 ไร่ที่อยู่ติดๆ กัน(การให้น้ำแบบไหลตามร่อง 1 ไร่ และการให้น้ำด้วยสปริงเกอร์ 1 ไร่) ในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกออกเป็นพื้นที่ละ 2.11 ไร่ได้ สาเหตุเพราะเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่เกินที่จะควบคุมตัวแปรหลายๆ ตัวให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกันได้ เช่น ชนิดสายพันธุ์ จำนวนเหง้า/พื้นที่ แสงแดด แรงลมที่พัดต้นประเภทของดิน ค่า PH ของดิน เป็นต้น ข้อมูลเฉพาะของพื้นที่ทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

2.1 การออกแบบระบบการส่งน้ำ

จากรูปที่ 3 การออกแบบให้สปริงเกอร์ทำงานทีละกลุ่ม โดยเริ่มจากกลุ่มที่ 1 มีจำนวนสปริงเกอร์ 3 แถว ส่วนกลุ่มที่ 2 ถึงกลุ่มที่ 6 มีจำนวนสปริงเกอร์ 4 แถว กลุ่มที่ 7 ถึงกลุ่มที่ 9 มีจำนวนสปริงเกอร์ 4 แถว ส่วนกลุ่มที่ 10 และกลุ่มที่ 11 มีจำนวนสปริงเกอร์ 3 แถว การออกแบบระบบส่งน้ำ [12] แสดงดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

ตารางที่ 1 ข้อมูลเฉพาะของพื้นที่ทดสอบทั้งสอง

ข้อมูล	สปริงเกอร์	ร่องน้ำ
สายพันธุ์หน่อไม้ฝรั่ง [2]	บรีอคอิมปรีฟ	บรีอคอิมปรีฟ
พื้นที่ทดสอบ(ไร่)	1	1
จำนวนเหง้า อายุ 6 ปี	2,271	2,308
ประเภทดิน	ร่วนปนทราย	ร่วนปนทราย
ค่าPHเฉลี่ยของดิน	6.9	6.9
(วัดกระจายทั่วพื้นที่ 9 จุด)		

$$V = 0.849 \times C \times R^{0.63} \times S^{0.54} \quad (1)$$

เมื่อ V = ความเร็วในเส้นท่อ, เมตร/วินาที

R = รัศมีไฮดรอลิก (Hydraulic Radius)

ในกรณีที่กลมมีค่าเท่ากับ d/4, เมตร

S = ความชันของพลังงาน (Hydraulic Gradient), เมตร/เมตร

C = ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของผิวภายในท่อ (ท่อ PVC มีค่าเท่ากับ 150)

$$S = \frac{h_L}{L} = \frac{10.67 \times Q^{1.852}}{C^{1.852} \times d^{4.8704}} \quad (2)$$

เมื่อ

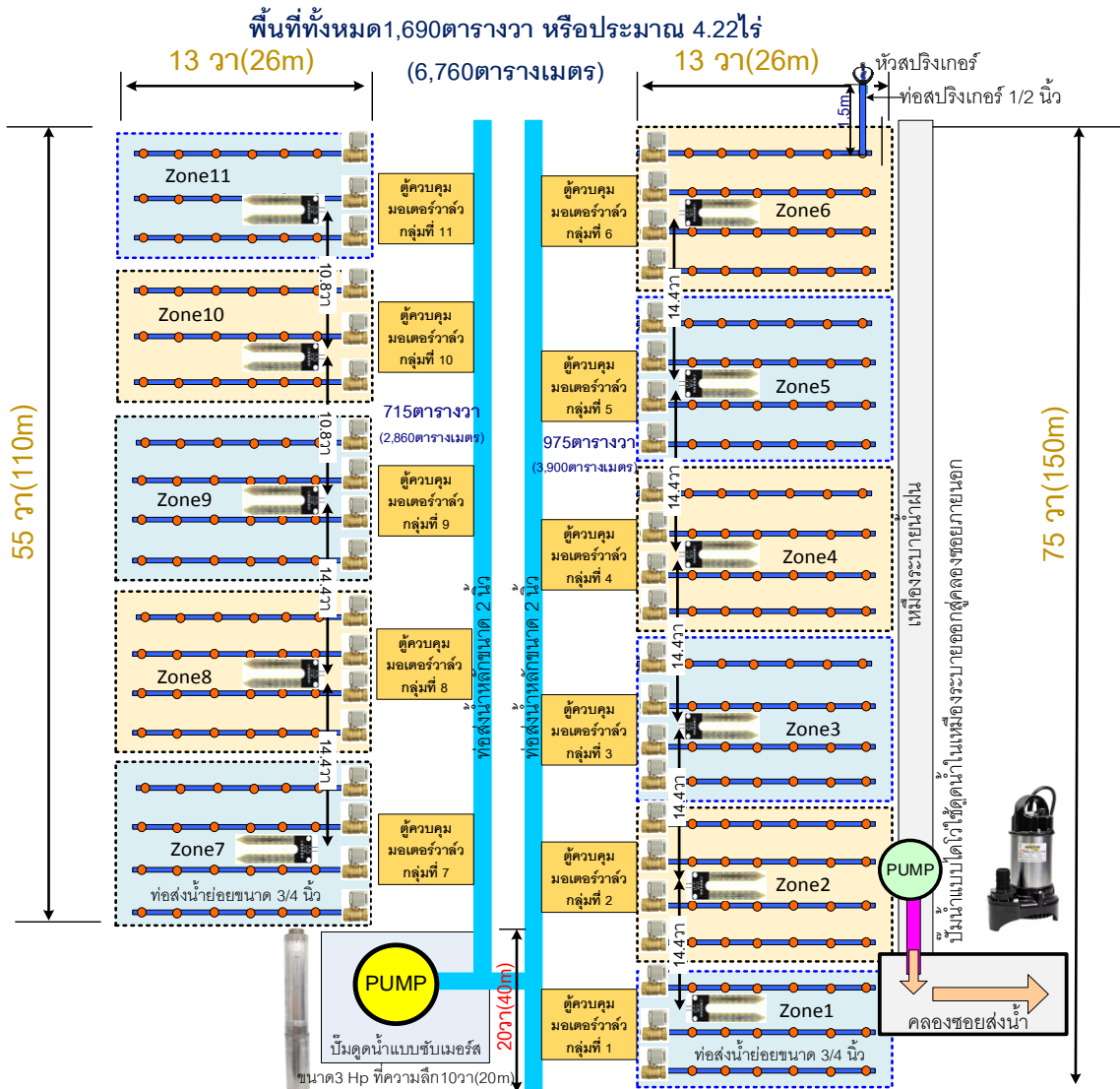
h_L = การสูญเสียพลังงานในเส้นท่อ, เมตร

L = ความยาวของท่อ, เมตร

Q = อัตราการไหลของน้ำในเส้นท่อ, ลบ.ม./วินาที

d = เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อ, เมตร

จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) สามารถคำนวณหาความชันของพลังงาน การสูญเสียพลังงานในเส้นท่อและความเร็วในเส้นท่อ แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 แผนการวางระบบการให้น้ำด้วยระบบสปริงเกอร์ภายในไร่นอกไม้ฝรั่ง



ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบส่งน้ำในไร่นาผลไม้ฝรั่ง

ท่อขนาด (นิ้ว)	ความยาว (เมตร)	อัตราการไหล* (ลบ.ม./ ชม.)	ความชันของ พลังงาน (เมตร/เมตร)	การสูญเสียพลังงานใน เส้นท่อ (เมตร)	ความเร็วในเส้นท่อ (เมตร/วินาที)
2	116.0	12,000	0.053	6.120	1.661
3/4	26.0	3,000	0.482	12.53	2.957
1/2	1.5	500	0.126	0.189	1.111

*หมายเหตุ: การคำนวณอัตราการไหลเพื่อหาการสูญเสียพลังงานสูงสุด ดำเนินการจากจุดจ่ายน้ำที่อยู่ห่างจากเครื่องสูบน้ำมากที่สุดและประเมินให้หัวจ่ายแต่ละหัวให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 500 ลิตรต่อชั่วโมง และในท่อหลักซึ่งมีขนาด 2 นิ้ว สามารถจ่ายน้ำให้กับหัวจ่าย 1 ชุด สามารถรองรับท่อส่งน้ำย่อย ขนาด ¾ นิ้ว จำนวน 4 แถว แต่ละแถวมีหัวจ่ายทั้งหมด 6 หัวจ่าย

ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบในตารางที่ 2 สามารถนำไปคำนวณหาขนาดกำลังมอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำ [13] ดังสมการที่ (3)

$$P = \frac{\rho \times Q \times H}{102 \times \eta} \quad (3)$$

P = กำลังไฟฟ้า, kW

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

H = พลังงานที่ต้องการทั้งหมด, เมตร

η = ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ (กำหนดให้ = 70%)

กำหนดให้มีแรงดันน้ำที่ออกจากหัวปล่อยเท่ากับ 2 บาร์ หรือเท่ากับ 20 เมตร และหัวปล่อยแต่ละหัวมีท่อตั้งขึ้นในแนวตั้ง 1.5 เมตร ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น

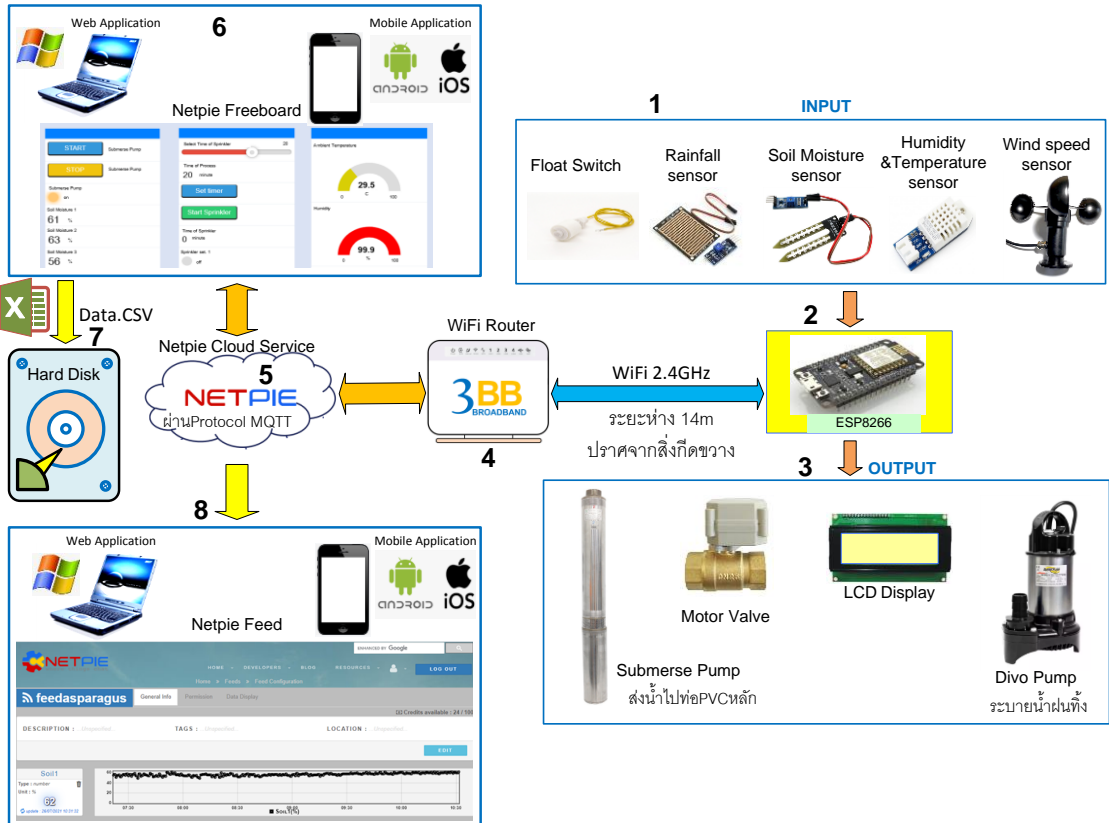
$$P = \frac{(1,000)(12/3,600)(6.12 + 12.53 + 0.189 + 1.5 + 20)}{(102)(0.7)}$$

P = 1.883 kW

ดังนั้น กำลังที่ต้องการเท่ากับ 1.883 กิโลวัตต์ หรือเท่ากับ 2.52 แรงม้าเลือกที่ใกล้เคียง 3 Hp (ประมาณ 2.2 kW)

2.2 การออกแบบระบบควบคุมสปริงเกอร์และการระบายน้ำทิ้งด้วยอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

จากรูปที่ 4 ได้นำ Node MCU ESP8266 ที่นิยมใช้งานด้าน IoT [14] เป็นตัวประมวลผลและควบคุมการทำงานทั้งหมด โดยมีภาคอินพุตที่ประกอบด้วยตัวรับรู้ต่างๆ ได้แก่ ตัวรับรู้ความชื้นดิน ตัวรับรู้ความชื้นและอุณหภูมิอากาศ ตัวรับรู้น้ำฝน ตัวรับรู้ความเร็วลม สวิตช์ลูกลอย ส่วนภาคเอาต์พุตประกอบด้วยจอแสดงผลแบบ LCD ชุดควบคุมการทำงานปั๊มน้ำบ่อบาดาล ชุดควบคุมการทำงานปั๊มน้ำระบายน้ำฝนที่ชุดควบคุมการเปิดปิดสปริงเกอร์ด้วยมอเตอร์วาล์วฝั่งด้านเน็ตเวิร์กใช้คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของเน็ตพาย [15] ที่สามารถสื่อสารผ่านโปรโตคอล MQTT [16-17] กับเว็บแอปพลิเคชัน หรือโมบายแอปพลิเคชันได้ทั้งระบบ ios และ Android เพื่อให้สามารถใช้งานเน็ตพายฟรีบอร์ดและเน็ตพายพีดีได้ ส่วนภาคการสื่อสารจาก Node MCU ESP8266 ใช้สัญญาณ WiFi คลื่นความถี่ 2.4 GHz [18] ซึ่งกินพลังงานต่ำ [19] ไปยังเราเตอร์ของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต 3BB



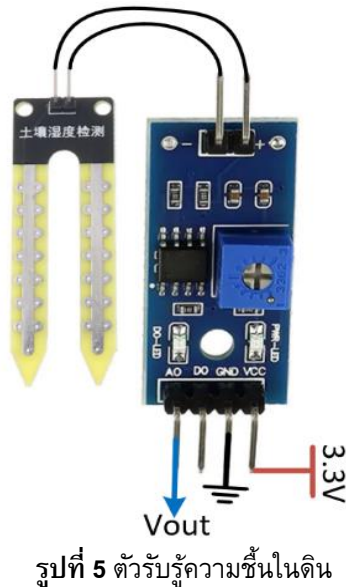
รูปที่ 4 แผนผังของระบบการควบคุมและติดตามการจัดการน้ำภายในไร่หน่อไม้ฝรั่งด้วยระบบ IoT

2.2.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

การวัดความชื้นของดินกับพีชชนิดต่างๆ ด้วยตัวรับรู้ความชื้นดินที่ต่อร่วมกับ Node MCU ESP8266 [20] จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 5 ใช้หลักการการนำไฟฟ้า โดยใช้ดินระหว่างหัวโพรบแบบก้ามปูเป็นตัวความต้านทาน ค่าความชื้นของดินจะ

แปรผกผันกับแรงดันไฟฟ้าขาออกจากวงจรขยาย ส่วนรูปที่ 6 เป็นการเก็บข้อมูลหาความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ดินเทียบกับแรงดันไฟฟ้าขาออกของตัวรับรู้ เมื่อใช้วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least-square Method) ได้ค่าดังสมการที่ (4)

$$\%Soil\ Moisture = 198.572923715544 - 208.426028539074 \times V + 097.501431504861 \times V^2 - 016.113293254545 \times V^3 \quad (4)$$



รูปที่ 6 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของดินเทียบกับแรงดันไฟฟ้าขาออก

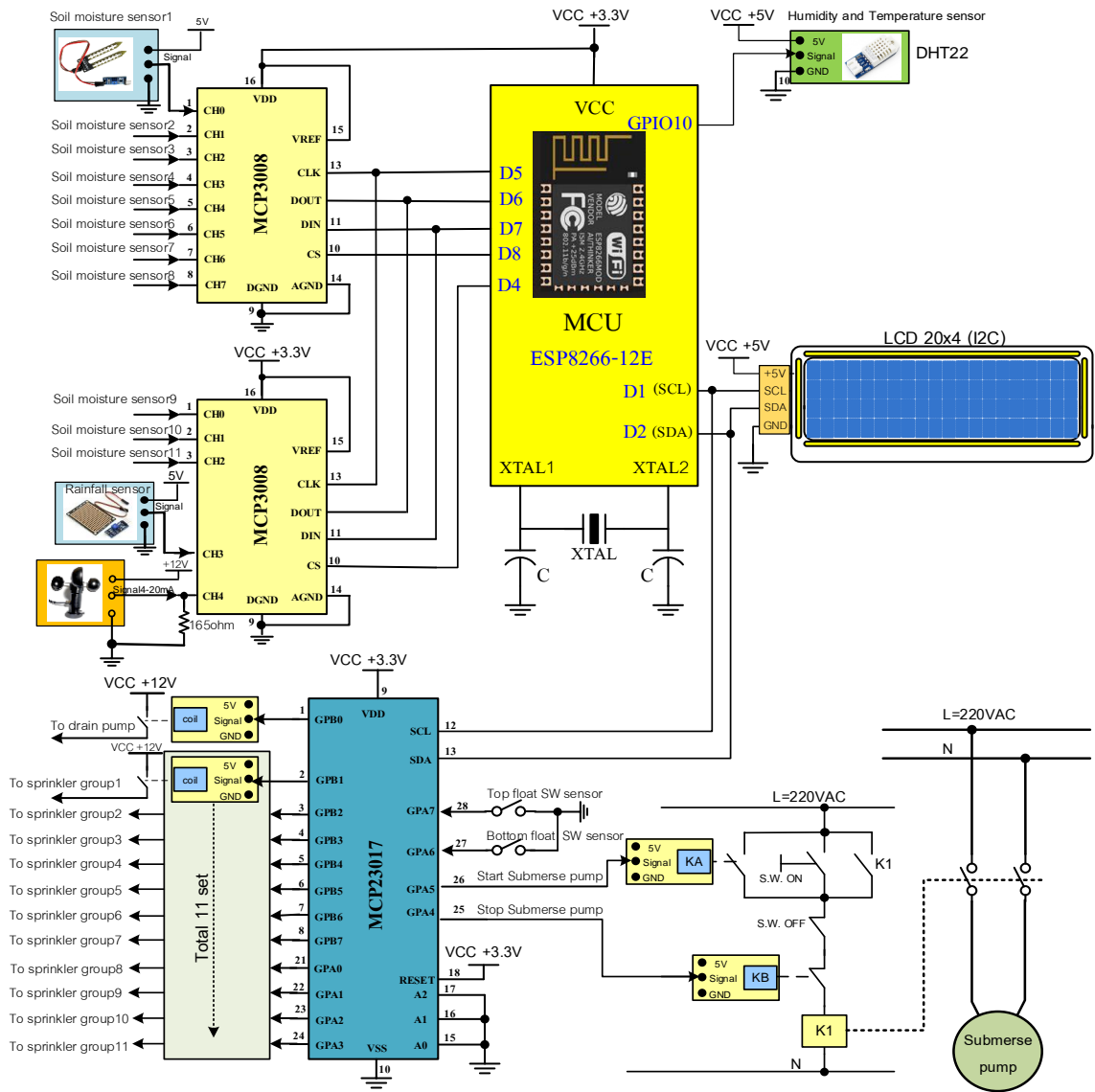
จากรูปที่ 7 นอกจากใช้ Node MCU ESP8266 เป็นตัวควบคุมระบบแล้วยังใช้ IC เบอร์ MCP 3008

เป็นตัวแปลงสัญญาณ ADC ขนาด 10 บิต รับค่าจากตัวรับรู้อ่างๆ และ IC เบอร์ MCP 23017 เป็นตัวขยาย I/O พอร์ต ในกรณีที่เกิดสัญญาณอินเทอร์เน็ทขาดหายชั่วคราวจะออกแบบซอฟต์แวร์ให้มีการเชื่อมต่อใหม่ แต่ถ้าสัญญาณขาดหายนานหรือมีการซ่อมแซมปรับปรุงระบบ ยังสามารถมีระบบทำงานด้วยมือ โดยการควบคุมจากปุ่มสวิตช์ ON/OFF สำรองไว้อีกด้วย

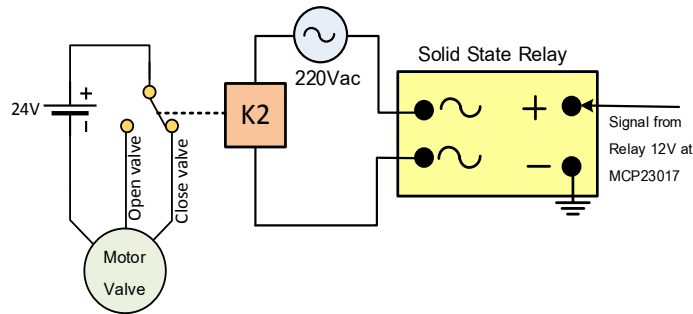
ส่วนรูปที่ 8 เป็นวงจรการควบคุมการทำงานของมอเตอร์วาล์วที่รับสัญญาณจากภาคควบคุมของรูปที่ 7 ส่วนรูปที่ 9 เป็นภาพถ่ายหน้างานจริงขณะมีการวัดความชื้นของหัวโพรบที่ความลึก 10 cm จากผิวดิน ซึ่งเป็นระดับเดียวกับรากหน่อไม้ฝรั่ง และการจ่ายน้ำของสปริงเกอร์ที่ถูกควบคุมจากมอเตอร์วาล์ว

2.3 การออกแบบซอฟต์แวร์

ฝั่งด้านเน็ตเวิร์กได้ใช้คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของเน็ตพาย [15] โดยที่เน็ตพายจะมี MQ TELEMETRY TRANSPORT (MQTT) เป็นโพรโตคอลสื่อสารถูกนำมาใช้ในการสื่อสารแบบ M2M หรือ IoT ซึ่งเหมาะสมกับอุปกรณ์ปลายทางที่มีขนาดเล็ก/พลังงานจำกัด หรือในการสื่อสารระยะไกลที่ต้องการใช้งานความกว้างแถบความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ โมเดลการสื่อสารของโพรโตคอลแสดงดังรูปที่ 10 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือไคลเอนต์และโบรกเกอร์ โดยที่โบรกเกอร์เป็นจุดศูนย์กลางในการรับส่งข้อความระหว่างไคลเอนต์ [15] โดยไคลเอนต์ที่เป็น Node MCUESP8266 มีฟังก์ชัน onMsgHandler ผ่านค่าที่ Subscribe เข้ามา ส่วน microgear.publish และ microgear.writeFeed ใช้ในการ Publish ค่าออกไปยังไคลเอนต์ที่เป็นโน้ตบุ๊กและโทรศัพท์เคลื่อนที่



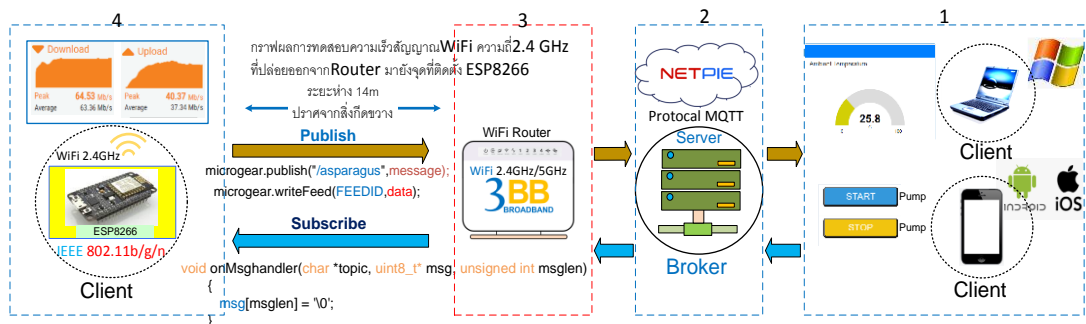
รูปที่ 7 วงจรควบคุมโดยใช้ Node MCU ESP266 ประมวลผลการจัดการภายในไร้พรมแดนด้วยระบบ IoT



รูปที่ 8 วงจรการควบคุมการทำงานของมอเตอร์วาล์วที่จ่ายน้ำให้กับสปริงเกอร์



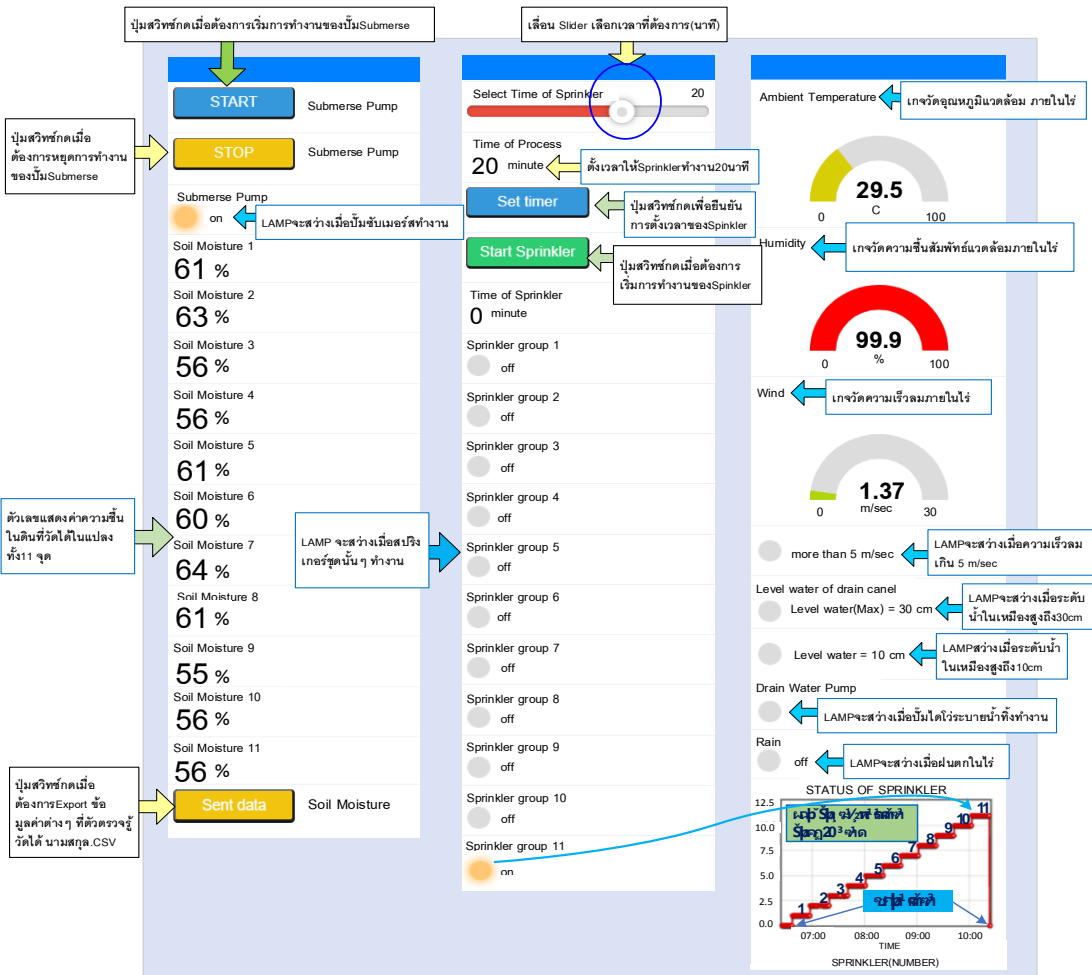
รูปที่ 9 การวัดความชื้นของหัวโพรบตัวรับรู้และการจ่ายน้ำของสปริงเกอร์ตลอดแนวจำนวน 6 หัวจ่าย



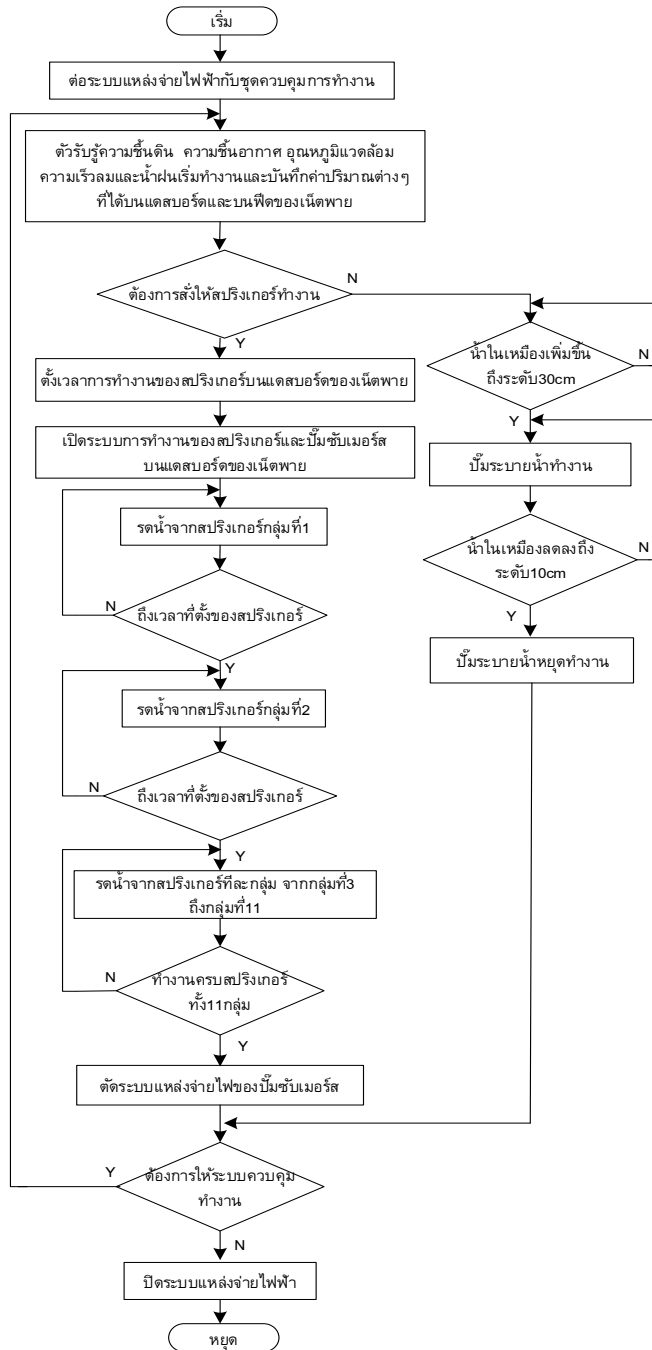
รูปที่ 10 การสื่อสารของโปรโตคอล MQTT ของเน็ตพาย

ในการทดสอบระบบสื่อสารโดยใช้สัญญาณ WiFi 2.4 GHz จากเราเตอร์อินเทอร์เน็ตบ้าน 3BB ไปยัง Node MCU ESP8266 ที่ระยะห่าง 14 เมตร ปรากฏจากสิ่งกีดขวาง ได้อัตราการส่งถ่ายข้อมูลที Upload ได้ค่าสูงสุด 40.37 Mbps และค่าเฉลี่ยที่ 37.34 Mbps ส่วนที่ Download ได้ค่าสูงสุด 64.53 Mbps และค่าเฉลี่ยที่ 63.36 Mbps ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดจากมาตรฐาน IEEE 802.11n[18]

(รองรับ สูงสุด ต้อง ไม่เกิน 300 Mbps และมีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณได้ระยะประมาณ 70 เมตรในโครงสร้างปิดและ 250 เมตรในที่โล่งแจ้ง) รูปที่ 11 เป็นการใช้งานวิดเจ็ทต่างๆ บนแดสบอร์ดของแพลตฟอร์มเน็ตพาย และจากรูปที่ 12 เป็นแผนผังการทำงานของซอฟต์แวร์ที่ออกแบบ ซึ่งนำไปสู่การออกแบบโค้ดโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม Arduino IDE [21]



รูปที่ 11 วิดเจ็ทต่างๆ ของระบบการควบคุมและติดตามขณะเก็บผลการทำงาน



รูปที่ 12 ผังงานการทำงานของซอฟต์แวร์ที่ออกแบบ



3. ขั้นตอนและผลการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งได้ 2 กรณี คือกรณีที่ 1 หาปริมาณความแตกต่างของผลผลิตที่ได้จากการให้น้ำด้วยวิธีการใช้สปริงเกอร์เทียบกับวิธีปล่อยน้ำไหลตามร่อง โดยใช้พื้นที่ทดสอบวิธีการละ 1 ไร่ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1 กรณีที่ 2 ทดสอบการให้น้ำแบบเติมพื้นที่ 4.22 ไร่ด้วยวิธีการใช้สปริงเกอร์เทียบกับการปล่อยน้ำตามร่อง เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายต่างๆ ได้แก่ ค่าแรงงาน ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำบาดาล

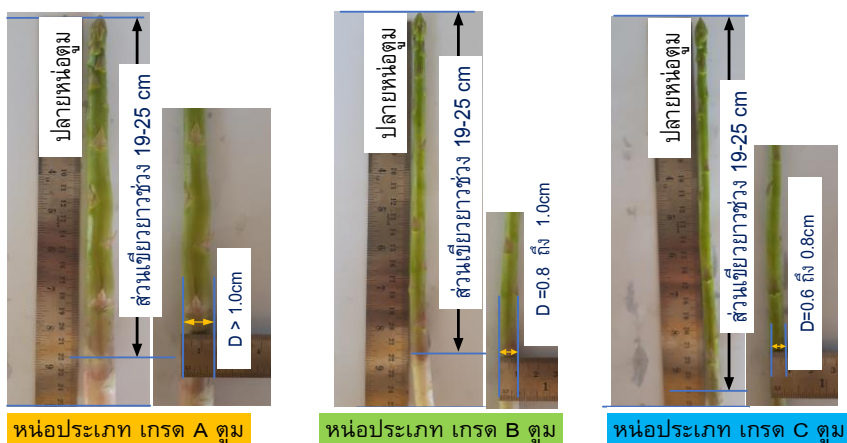
3.1 ขั้นตอนการทดสอบ

กรณีที่ 1 ให้น้ำหน่อไม้ฝรั่งจากวิธีทั้งสองแบบที่ช่วงเวลาเช้าของแต่ละวันเป็นระยะเวลา 60 วันต่อเนื่อง โดยวิธีการใช้สปริงเกอร์จะใช้เวลา 52 นาที ความชื้นดินที่วัดได้ประมาณ 60% ส่วนวิธีการปล่อยน้ำไหลตามร่องจะปล่อยน้ำแบบ 2 วันต่อ 1 ครั้ง (ถ้าปล่อยที่เวลามากกว่า 2 วันความชื้นจะต่ำกว่า 60%) ส่วนเกณฑ์การแบ่งเกรดหน่อไม้ฝรั่งแบบหน่อเขียวแสดงดังรูปที่ 13 [22] ผลการทดสอบน้ำหนักหน่อไม้ฝรั่งของแต่ละเกรดแสดงดังรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 16 และราคาขาย

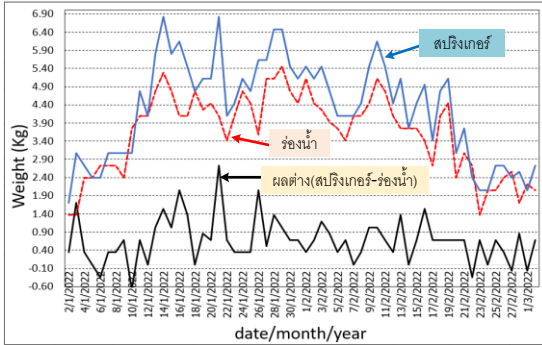
แสดงดังรูปที่ 17 ถึงรูปที่ 21 ส่วนตารางที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาขายที่ได้จากการทดสอบพื้นที่ 1 ไร่ และค่าที่ได้จากการพยากรณ์กรณีที่ใช้พื้นที่เต็ม 4.22 ไร่/รอบ และไร่/ปี (โดยปกติใน 1 ปี สามารถเก็บผลผลิตได้ 4 รอบ รอบละ 2-2.5 เดือน)

การวิจารณ์ผลในเรื่องน้ำหนักของหน่อไม้ฝรั่ง: จากการให้น้ำแบบระบบสปริงเกอร์จะทำให้น้ำกระจายทั่วบริเวณดินมีความชื้นที่สม่ำเสมอกันทั้งไร่ ต่างจากการให้น้ำไหลตามร่องน้ำ ซึ่งดินจะแฉะบริเวณที่ลุ่มหรือหน้าอาจจะไหลขึ้นไปไม่ถึงกรณีที่เป็นที่ดอน

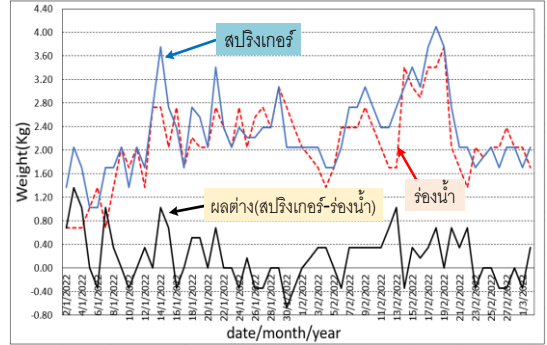
จากรูปที่ 14 เห็นได้ว่าตลอดระยะเวลา 60 วัน การใช้ระบบสปริงเกอร์จะให้น้ำหนักของหน่อเกรด A ตูมมากกว่าการให้น้ำไหลตามร่องอย่างชัดเจน ส่วนรูปที่ 15 จำนวนน้ำหนักของหน่อ A ตูมจากการใช้ระบบสปริงเกอร์ก็ยังมีแนวโน้มมากกว่าแบบให้น้ำตามร่อง แต่รูปที่ 16 จำนวนน้ำหนักของหน่อ C ตูมจากการให้น้ำตามร่องมากกว่าแบบใช้ระบบสปริงเกอร์และจากรูปที่ 17 น้ำหนักรวมการใช้น้ำจากระบบสปริงเกอร์มากกว่าการให้น้ำไหลตามร่อง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3



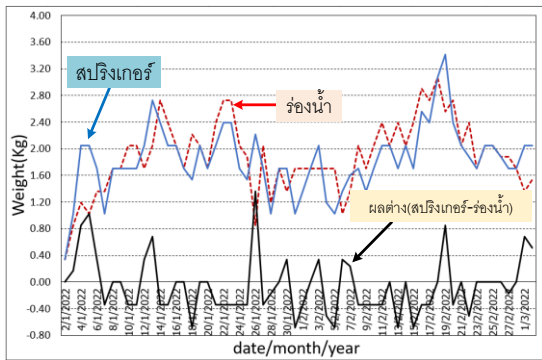
รูปที่ 13 เกณฑ์การแบ่งเกรดหน่อไม้ฝรั่งแบบหน่อเขียว



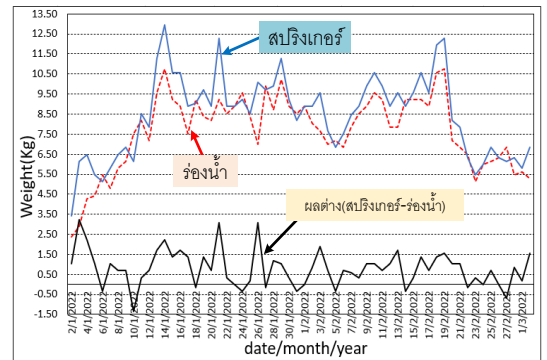
รูปที่ 14 น้ำหนักหน่อไม้ฝรั่งเกรด A ตูม



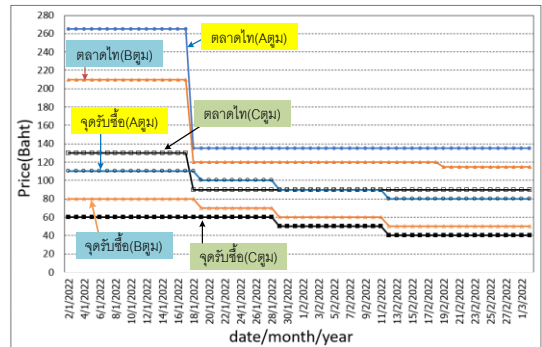
รูปที่ 15 น้ำหนักหน่อไม้ฝรั่งเกรด B ตูม



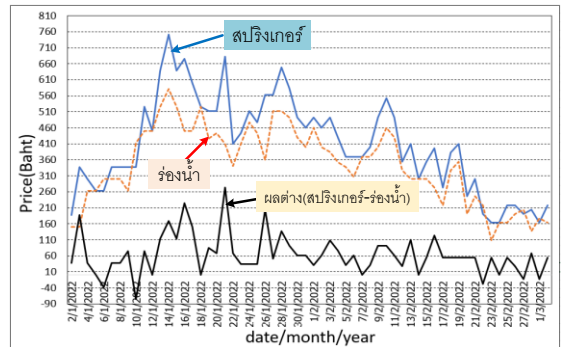
รูปที่ 16 น้ำหนักหน่อไม้ฝรั่งเกรด C ตูม



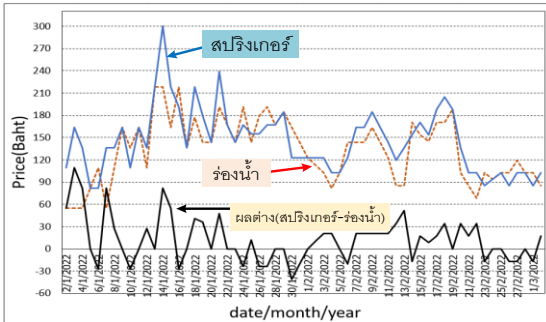
รูปที่ 17 รวมน้ำหนักหน่อไม้ฝรั่งเกรด A, B, C ตูม



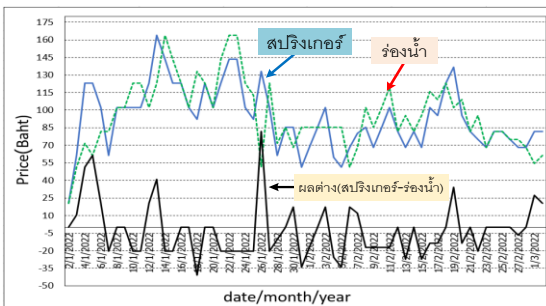
รูปที่ 18 ราคาหน่อไม้ฝรั่งจากตลาดไทและจากจุดรับซื้อ



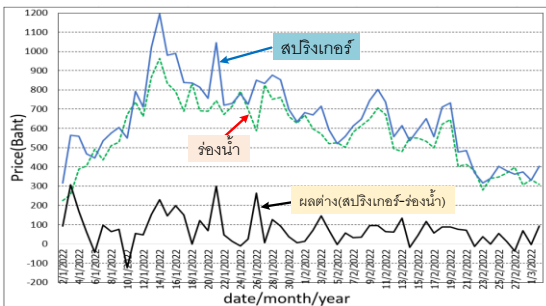
รูปที่ 19 ราคาหน่อไม้ฝรั่งเกรด A ตูมจากจุดรับซื้อ



รูปที่ 20 ราคาหน่อไม้ฝรั่งเกรด B ตูมจากจุดรับซื้อ



รูปที่ 21 ราคาหน่อไม้ฝรั่งเกรด C ตูมจากจุดรับซื้อ



รูปที่ 22 ราคารวมหน่อไม้ฝรั่งเกรด A, B, C ตูม

การวิจัยผลในเรื่องราคาของหน่อไม้ฝรั่ง: ในการรับซื้อหน่อไม้ฝรั่งจากชาวไร่ ปกติจะมีพ่อค้าคนกลางเปิดจุดรับซื้อบริเวณพื้นที่ที่มีการเพาะปลูก โดยในสภาวะปกติที่หน่อไม้ฝรั่งยังไม่ขาดแคลน การกำหนดราคาจะต่ำกว่าแต่มีแนวโน้มขึ้นลงตามราคาท้องตลาดเหมือนกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบราคาจากทั้ง 2 แหล่ง โดยใช้ฐานข้อมูลจากราคาที่ตลาดไท [23] จากรูปที่ 18 เห็นได้ว่าช่วงต้นปีเป็นช่วงที่หน่อไม้ขาดแคลนจะมีราคาแพงมาก แต่ราคาที่จุดรับซื้อไม่ได้แปรเปลี่ยนในอัตราส่วนเหมือนกับในสถานการณ์ปกติจากข้อมูลวิจัยชุดนี้ ถ้าได้นำไปบริหารจัดการในเรื่องเศรษฐศาสตร์ให้ดี จะทำให้เกษตรกรสามารถเพิ่มรายรับได้อีกมาก เช่น ถ้านำไปขายที่ตลาดไทจะได้ราคาที่สูงกว่าขายที่จุดรับซื้อตามไร่ แต่ต้องคำนึงถึงรายจ่ายที่เกิดขึ้นตามมาด้วย เช่น ค่าแรงงาน ค่าขนส่งสินค้า ค่าเช่าพื้นที่ ค่าตู้แช่เย็นผัก ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำ ค่าประกันความเสี่ยงในการขนส่ง อื่นๆ มาประกอบรวมด้วย

จากรูปที่ 19 ถึง 22 และตารางที่ 3 เห็นได้ว่าผลต่างราคากรณีที่เป็นเกรด A ตูม กรณีจากการใช้ระบบสปริงเกอร์มีค่ามากกว่าแบบการให้น้ำไหลตามร่องถึง 3,786 บาท/ไร่/รอบ (ซึ่งมีค่าต่างจากหน่อ B ตูมและ C ตูม ที่ราคาแตกต่างกันไม่มากนัก) และถ้าพยากรณ์เต็มพื้นที่ 4.22 ไร่ จะสามารถเพิ่มรายได้ได้อีก 63,908 บาท/ปี แต่ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องนำมาพิจารณาอีก เช่น ราคาท้องตลาด โรคพืช ศัตรูพืช สภาพแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นอากาศ แสงสว่าง แร่ลุ่ม คุณภาพดิน และภัยธรรมชาติ อื่นๆ



3.2 ขั้นตอนการทดสอบ กรณีที่ 2

ทดสอบการให้น้ำแบบเติมพื้นที่ 4.22 ไร่ ด้วยวิธีการควบคุมด้วยระบบ IoT ดังรูปที่ 10 โดยเปิดสปริงเกอร์กลุ่มละ 20 นาที ความชื้นดินที่วัดได้จากตัวรับรู้ 11 ตัว แสดงค่าในแดชบอร์ดดังรูปที่ 11 มีค่าอยู่ในช่วง 55-64% และยังมีบันทึกเก็บในพีดีของเน็ตพายเพื่อดูค่าย้อนหลังได้อีกด้วย

การวิจารณ์ผลในเรื่องค่าต้นทุน: ข้อมูลการใช้ปริมาณน้ำและจำนวนพลังงานไฟฟ้าดังตารางที่ 4 ส่วนตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายจากทั้งสองวิธีการเห็นได้ว่าจะประหยัดค่าแรงงานได้ 90,000 บาท ค่าไฟฟ้าได้ 9,246 บาทส่วนค่าน้ำบาดาลและค่าอนุรักษ์น้ำ

บาดาลจะยกเว้นเพราะเป็นท้องที่ที่เพาะปลูกและไม่มีน้ำประปาใช้ [24] ดังนั้นการใช้สปริงเกอร์เมื่อนำค่าผลผลิตที่เพิ่มขึ้น 74,120 บาท จากตารางที่ 3 รวมกับผลต่าง 99,246 บาท จากตารางที่ 5 มีค่าเท่ากับผลประโยชน์ 173,366 บาท/ปี เมื่อนำค่านี้ไปหารค่าการลงทุนที่ใช้แบบการให้น้ำด้วยสปริงเกอร์ (180,000 บาท) จะได้ค่าระยะเวลาการคืนทุน [25] ดังสมการที่ (5) มีค่าเท่ากับ 1.04 ปี ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำสามารถคืนทุนได้เร็วเหมาะแก่การลงทุนได้ทันที

$$\text{ระยะเวลาการคืนทุน} = \frac{\text{ค่าการลงทุน}}{\text{ค่าประหยัด}} \quad (5)$$

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาหน่วยไม่ฝรั่งที่ได้จากการทดสอบบนพื้นที่ 1 ไร่และได้จากการพยากรณ์บนพื้นที่ 4.22 ไร่

ข้อมูล	A ตุ่ม	B ตุ่ม	C ตุ่ม	รวม
น้ำหนัก kg./ไร่ (สปริงเกอร์)	258	139	110	507
น้ำหนัก kg./ไร่ (ร่องน้ำ)	218	127	113	458
ผลต่างน้ำหนัก/ไร่	40	12	-3	49
ผลต่างน้ำหนัก/4.22ไร่/รอบ	168.8	50.64	-12.66	206.76
ผลต่างน้ำหนัก/4.22ไร่/4รอบ	675.2	202.5	-50.6	827.1
ราคา บาท/ไร่/รอบ (สปริงเกอร์)	24,437	8,745	5,592	38,774
ราคา บาท/ไร่/รอบ (ร่องน้ำ)	20,651	7,993	5,739	34,383
ผลต่างราคา/ไร่/รอบ	3,786	752	-147	4,391
ผลต่างราคา/4.22ไร่/รอบ	15,977	3,173	-620	18,530
ผลต่างราคา/4.22ไร่/4รอบ	63,908	12,692	-2,480	74,120



ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการใช้ปริมาณน้ำและไฟฟ้าจากการทดสอบทั้งสองวิธีการ

ข้อมูล	สปริงเกอร์	ร่องน้ำ
จำนวนเวลาให้น้ำ/1ไร่/วัน	52นาที (ควบคุมความชื้นดินประมาณ 60%)	2 วัน / 1ครั้ง ครั้งละ 3 ชั่วโมง = 1.5 ชั่วโมง/วัน
ปริมาณน้ำ/1ไร่/วัน	10.4 ลบ.ม. (ทดสอบ 1นาที่=200ลิตร)	18 ลบ.ม. (ทดสอบ1นาที่= 200ลิตร)
ปริมาณน้ำ/4.22ไร่/วัน	43.888 ลบ.ม.	75.96 ลบ.ม.
ปริมาณน้ำ/4.22ไร่/10เดือน	13,166.4ลบ.ม.	22,788 ลบ.ม.
พลังงานไฟฟ้า/4.22ไร่/วัน(ปั๊มน้ำ 2.2 kW)	8.046 หน่วย	13.926 หน่วย
พลังงาน/4.22ไร่/10เดือน	2,414 หน่วย	4,178 หน่วย

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายจากทั้งสองวิธีการ

ข้อมูล	สปริงเกอร์	ร่องน้ำ	ผลต่าง
ค่าแรง(บาท/วัน)	0	*300	300
ค่าแรง(บาท/10เดือน)	0	90,000	90,000
ค่าไฟฟ้า(บาท/วัน) (ประมาณหน่วยละ 4 บาท)[26]	32.18	63	30.82
ค่าไฟฟ้า(บาท/10เดือน)	9,654	18,900	9,246
ค่าธรรมเนียมน้ำ (บาท/10เดือน)	0	0	0
ผลรวมค่าใช้จ่าย/10เดือน	9,654	108,900	99,246

*หมายเหตุ: ค่าแรงงาน กรณีที่ใช้วิธีปล่อยน้ำตามร่อง เนื่องจากเป็นพื้นที่ขนาด 4.22 ไร่ แต่การให้ปั๊มน้ำขนาด 2.2kW มีอัตราการไหล 200 ลิตร/นาที่ ไม่สามารถจ่ายน้ำไปเต็มพื้นที่ในวันเดียวกันได้ เพราะต้องใช้เวลารวมถึง 12.66 ชม(4.22ไร่x3ชม.) ในทางปฏิบัติจะแบ่งพื้นที่การให้น้ำเป็น 2 แปลง สลับกันวันละแปลง ซึ่งหมายความว่าต้องเสียค่าจ้างทุกวันวันละ 300 บาท



4. บทสรุป

การนำระบบควบคุมระยะไกลด้วยอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาช่วยในการจัดการน้ำ สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตให้ได้ขนาดหน่อเกรด A ตูมได้มากขึ้น และยังสามารถช่วยลดต้นทุนในเรื่องของค่าแรงงานได้สูงมาก หรือช่วยแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนแรงงาน รวมทั้งแก้ปัญหาการทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพของคนงานที่บางครั้งปล่อยให้หน้าขังร่องมากเกินไปจนเป็นเหตุให้ต้นเกิดเป็นโรคเชื้อรา แต่ถ้าให้น้ำน้อยเกินไปจะทำให้หน่อมีเส้นใยมากขาดคุณค่าทางโภชนาการ เมื่อใช้ระบบสปริงเกอร์จะช่วยทำให้ดินเปียกชื้นอย่างสม่ำเสมอทั้งพื้นที่ อีกทั้งยังช่วยไล่เพลี้ย [22] ที่เกาะตามต้นโดยการเปิดน้ำรดที่ระยะเวลานั้นๆ และยังสามารถลดความเสียหายจากน้ำท่วมไร้อันเนื่องมาจากฝนตกปริมาณมากได้อีกด้วย

ค่าปริมาณต่างๆ ที่ได้จากตัวรับรู้ ข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการเริ่มต้นเรียนรู้ถึงพฤติกรรมของหน่อไม่ฝรั่งว่าชอบหรือไม่ชอบกับสภาพแวดล้อมอย่างไร ซึ่งเป็นแนวทางการปรับปรุงการรดน้ำให้ดินมีความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมแล้วหยุดการรดน้ำ หรือรดน้ำเพิ่มเพียงเล็กน้อย เมื่อได้ข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องมีปริมาณมากพอก็นำไปสู่การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI: Artificial Intelligence) ในการช่วยจัดการเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและปริมาณสูงโดยใช้ต้นทุนที่ต่ำ ซึ่งแนวทางปฏิบัติทั้งหมดนี้จะนำไปสู่เกษตรกรแม่นยำได้เป็นอย่างดี

5. ข้อเสนอแนะ

ในกรณีที่ไม่มีสะดวกด้วยรูปแบบการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นสัญญาณ WiFi ยังมีรูปแบบการสื่อสาร

แบบไร้สายด้วยรูปแบบอื่นๆ [27] จากข้อมูลที่ [28] ใช้การสื่อสารทางไกลแบบ LoRa มาใช้ควบคุมการทำงานของสปริงเกอร์อย่างอัตโนมัติ แต่ปัจจัยที่ต้องนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือก [27] ได้แก่ แถบความถี่ของสัญญาณ อัตราข้อมูล ระยะทางในการส่งข้อมูล การใช้พลังงาน และราคาอุปกรณ์ ส่วนในเรื่องของตัวรับรู้ความชื้นดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทนต่อสภาพการกัดกร่อนที่ผิวทองแดงต่ำ อาจเปลี่ยนหัวโพรบเป็นรุ่นที่เป็นแท่งตัวนำสแตนเลสกลมที่ทนต่อการกัดกร่อนได้สูง แต่ราคาจะมีค่าสูงกว่าแบบเดิมมาก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยที่กรุณาให้ความเห็นชอบในการอนุมัติงบประมาณ โดยโครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากบริษัทอุตสาหกรรมท่อน้ำไทย จำกัด และมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2563 ตามสัญญาขอรับทุนอุดหนุนการวิจัยหมายเลข ST001/2564

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://nationaltoday.com/national-asparagus-day/> (Accessed on 5 January 2022)
- [2] <http://www.doa.go.th/research/attachment.php?aid=1991> (Accessed on 7 January 2022)
- [3] M. Peebles, J.J. Barnett, M. Duke and S.H. Lim, Robotic harvesting of asparagus using machine learning and time-of-flight imaging, 16th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Proceeding, 2020, 1359-1364.



- [4] A. Leu, M. Razavi, L. Langstadtler, D.R. Durrant, H. Raffel, C. Schenck, A. Graser, and B. Kuhfuss, Robotic green asparagus selective harvesting, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(6), 2401-2409.
- [5] M.S. Kyi, L. Maw and H.M. Tun, Study of solar PV sizing of water pumping system for irrigation of asparagus, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2016, 5(6), 71-75.
- [6] https://www.doa.go.th/share/attachment.php?a_id=2791 (Accessed on 7 January 2022)
- [7] S.I. Hassan, M.M. Alam, U. Illahi, M.A. Ghamdi, S.H. Almotiri and M. Mohd, A Systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture, *IEEE Access*, 2021, 9(08), 32517-32548.
- [8] E.S. Mohamed, A. Belal, S.K. Elmabod, M. Shirbeny, A. Gad and M. Zahran, Smart farming for improving agricultural management, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2021, 24(3), 971-981.
- [9] https://about.att.com/newsroom/smart_farming_gives_boost_to_organic_asparagus.html (Accessed on 10 January 2022)
- [10] A.M. Soonapase, F. Altobelli, A.D. Marta, M. Ciarletti, Ploovium: a decision support system for increasing water use efficiency of irrigated crops, 2020 *IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, Proceeding, 2020, 328-332.
- [11] <https://www.doa.go.th/research/showthread.php?tid=913> (Accessed on 9 March 2022)
- [12] G. S. Williams, *Hydraulic Table*, John Wiley and Sons, New York, USA, 2018.
- [13] Er.R.K. Rajput, *Electrical Machines in SI Units.*, Laxmi Publications Ltd., New Delhi, India, 2016.
- [14] https://www.handsontec.com/pdf_learn/esp8266-V10.pdf (Accessed on 20 January 2022)
- [15] <https://netpie.io/tutorials> (Accessed on 3 March 2022)
- [16] A. Minteer, *Analytics for the Internet of Things (IoT)*, Packt Publishing Ltd., Birmingham, UK, 2017.
- [17] S.V. Mukherji, R. Sinha, S. Basak and S.P. Kar, Smart agriculture using internet of things and MQTT protocol, 2019 *International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (Com-IT-Con)*, Proceeding, 2019, 14-16.



- [18] https://th.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11 (Accessed on 12 March 2022)
- [19] O. JiHye , D.-H. Noh and Y.-H. Sohn, Empirical test of Wi-Fi environment stability for smart farm platform, 4th International Conference on Computer Applications and Information Processing Technology (CAIPT), Proceeding, 2017, 1-5.
- [20] P. Singh and S. Saikia, Arduino-based smart irrigation using water flow sensor, soil moisture sensor, temperature sensor and ESP8266 WiFi module, 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), Proceeding, 2016, 1-4.
- [21] <https://www.arduino.cc/en/main/software>. (Accessed on 15 March 2022)
- [22] http://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/Techno_ku60/res-25/index25.html (Accessed on 16 March 2022)
- [23] <https://talaadthai.com/product-search/result?q=%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89%E0%B8%9D%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B9%88%E0%B8%87> (Accessed on 1 January 2022)
- [24] <http://www.dgr.go.th/th/newsAll/124/3737> (Accessed on 3 April 2022)
- [25] <https://www.stou.ac.th/stouonline/lom/data/sec/Lom14/04-01-02.html> (Accessed on 2 April 2022)
- [26] <https://www.mea.or.th/profile/109/111> (Accessed on 4 April 2022)
- [27] V. Moysiadis, P. Sarigiannidis, V. Vitsas and A. Khelifi, Smart farming in Europe, Computer Science Review, 2021, 39, 1-22.
- [28] A. Nursyahid, T. Aprilian, T.A. Setyawan, Helmy, A. S. Nugroho and D. Susilo, Automatic sprinkler system for water efficiency based on LoRa network, 6th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), Proceeding, 2019, 1-6.

การเปรียบเทียบวิธีการประมาณเวลากิจกรรมในเทคนิคการประเมินค่าและควบคุมโครงการ

ณัฏฐวัฒน์ มะหา และ กัลยา บุญหล้า*

ภาควิชาคณิตศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kanlayab@nu.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 มีนาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 12 กรกฎาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 18 สิงหาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 16 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรม ด้วยเทคนิคการประมาณค่า 7 วิธี ได้แก่ วิธีประมาณแบบ PERT วิธีประมาณโดยการแจกแจงปรกติ วิธีประมาณโดยการแจกแจงล็อกนอร์มัล วิธีประมาณ PERT แบบปรับปรุง วิธีประมาณของ Ginzburg วิธีประมาณของ Shankar และ Sireesha และวิธีประมาณโดยการแจกแจงไวบูล โดยเกณฑ์ในการเปรียบเทียบคือค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรม จำนวนงานวิกฤตที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 5, 10, 20, ..., 90 และ 100 กิจกรรม ทำการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลทำซ้ำ 1,000 ครั้งในแต่ละสถานการณ์ ผลการศึกษาพบว่า ทุกวิธีการประมาณค่าให้งานวิกฤตเหมือนกัน วิธีการประมาณ PERT แบบปรับปรุงมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรมน้อยที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อจำนวนงานวิกฤตเพิ่มขึ้น และการพิจารณาในทุกวิธีการประมาณวิธีประมาณ PERT แบบปรับปรุงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับข้อมูลและสถานการณ์ที่ได้ทำการศึกษามากที่สุด

คำสำคัญ: งานวิกฤต; เวลาเฉลี่ยกิจกรรม; ความแปรปรวนของกิจกรรม; เทคนิคการประเมินค่าและควบคุมโครงการ

A Comparison of Activity Time Estimates Methods in PERT

Nanthawat Maha and Kanlaya Boonlha*

Department of Mathematics, Faculty of Science, Naresuan University

* Corresponding author, E-mail: kanlayab@nu.ac.th

Received: 1 March 2022; Revised: 12 July 2022; Accepted: 18 August 2022

Online Published: 16 December 2022

Abstract: The objective of this research was to study and compare methods for estimating the mean and variance of activity time with 7 approximation techniques, including the program evaluation and review technique (PERT) approximation method, the Normal distribution approximation method, the Lognormal distribution approximation method, the modified PERT approximation method, the Ginzburg's approximation method, the Shankar and Sireesha approximation method and the Weibull distribution approximation method. The criterion for comparison is the percentage error in estimating the mean and variance of activity time. The number of critical activities used in the study was 5, 10, 20, ..., 90, and 100 activities. The simulations were performed with the Monte Carlo technique 1,000 times for each situation. The results of this research showed that all approximation methods had the same critical activity. The modified PERT approximation method was the lowest percentage error in estimating the mean and variance of activity time and then decreases as the number of critical activities increased. Considering all methods, the modified PERT approximation method is the most appropriate for the data and situation studied.

Keywords: Critical activity; The activity mean; The activity variance; PERT



1. บทนำ

ในปัจจุบันการบริหารโครงการให้มีประสิทธิภาพจัดเป็นเรื่องสำคัญ โดยเฉพาะโครงการที่มีขนาดใหญ่ซึ่งประกอบด้วยงานย่อยหรือกิจกรรมต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก โดยงานย่อยแต่ละงานต้องใช้ทรัพยากร เช่น เวลา เงินทุน วัสดุ อุปกรณ์ แรงงาน ฯลฯ และความยากง่ายแตกต่างกัน การบริหารโครงการจำเป็นต้องมีการวางแผนหรือกำหนดขั้นตอนนี้และเวลาในการปฏิบัติงานย่อยแต่ละงาน ซึ่งบางงานอาจจะต้องมีการเรียงลำดับการดำเนินการ เช่น ต้องทำงาน A เสร็จก่อนจึงจะสามารถเริ่มต้นปฏิบัติงาน B ได้ ในขณะเดียวกันก็อาจมีงานที่สามารถดำเนินการไปพร้อม ๆ กัน [1] นอกจากนี้ประสบการณ์ของผู้บริหารแล้ว ยังต้องอาศัยเครื่องมือที่ดีที่จะช่วยให้ผู้บริหารสามารถวางแผนและควบคุมงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รัศกุน ครอบรอบทุกขั้นตอน มองเห็นภาพการดำเนินงานได้อย่างชัดเจน [2] ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการบริหารโครงการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แผนภูมิแกนต์ (Gantt Chart) ระเบียบวิธีวิกฤต (Critical Method: CPM) และเทคนิคการประเมินค่าและควบคุมโครงการ (Program Evaluation and Review Technique: PERT) ในการนำมาช่วยบริหารโครงการ เทคนิค PERT เน้นความสำคัญที่เหตุการณ์ไม่ใช่ที่งาน และงานแต่ละงานจะมีเวลาที่จะต้องอาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็นในการคำนวณเวลาด้วยสำหรับการประมาณเวลาของแต่ละงานจะต้องใช้ทฤษฎีการแจกแจงความน่าจะเป็นที่เหมาะสมกับข้อมูลที่เกิดขึ้น โดยรูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นที่สอดคล้องกับข้อมูลคือ การแจกแจงบีตา (Beta Distribution) ซึ่งการประมาณเวลาการทำงานของแต่ละงานประกอบด้วยข้อมูลเวลา 3 ค่า คือ ระยะเวลาที่คาดว่าจะทำงานเสร็จได้เร็วที่สุด (Optimistic Time: a) ระยะเวลาที่คาดว่าจะทำงานเสร็จได้ช้าที่สุด (Pessimistic Time: b) และระยะเวลาที่สามารถทำงานเสร็จได้โดยส่วนมาก (Most Likely Time: m) ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของโครงการได้จากการนำค่าประมาณข้อมูลเวลาทั้ง 3 ค่าจากการศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าและความแปรปรวนของเวลาในการทำกิจกรรมภายในโครงการ [3-4] เปรียบเทียบวิธีการประมาณของ Farnum วิธีการประมาณของ Ginzburg วิธีการประมาณแบบ PERT วิธีการประมาณของ Premachandra วิธีการประมาณโดยใช้การแจกแจงปกติ วิธีการประมาณการแจกแจงล็อกนอร์มัล โดยใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในการพิจารณาเปรียบเทียบในแต่ละวิธี ซึ่งการประยุกต์ใช้การประมาณค่าเวลาและความแปรปรวนภายในโครงการถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น Edward และคณะ [5] ได้นำเสนอสูตรในการประมาณค่าของเวลาโดยใช้การแจกแจงไวบูล (Weibull Distribution) ในการประยุกต์การประมาณค่าเวลาในการดำเนินโครงการกับเวลาการเดินทางของรถบรรทุก [6] การประยุกต์ใช้กับโครงการออกแบบและก่อสร้างเรือของประเทศอังกฤษ [7] และได้มีการนำเสนอวิธีประมาณค่าที่นำมาใช้กับข้อมูลลักษณะเบ้ขวาอีกด้วย [8]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยพบว่าวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลา กิจกรรมหลายวิธีการประมาณที่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงอยู่มาก ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อการศึกษาการวิเคราะห์กิจกรรมวิกฤต

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยพบว่าวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลา กิจกรรมหลายวิธีการประมาณที่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงอยู่มาก ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อการศึกษาการวิเคราะห์กิจกรรมวิกฤต



ของโครงการ ทำให้การบริหารจัดการโครงการนั้นเกิดข้อผิดพลาดและมีระยะเวลาแล้วเสร็จของโครงการที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจในศึกษาและเปรียบเทียบเทคนิคการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรมเพื่อหาวิธีที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด โดยวิธีการประมาณที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบ ได้แก่ เทคนิคการประมาณแบบ PERT วิธีประมาณการแจกแจงปกติ วิธีประมาณการแจกแจงลิอองนอร์มัล วิธีประมาณ PERT แบบปรับปรุง วิธีประมาณของ Ginzburg วิธีประมาณของ Shankar และ Sireesha และวิธีประมาณการแจกแจงไวบูล และในการศึกษาค้นคว้าผู้วิจัยสนใจศึกษาภายใต้สถานการณ์ที่ข้อมูลมีลักษณะเบ้ขวา ซึ่งลักษณะของการแจกแจงของตัวแปรสุ่มที่โค้งด้านซ้ายหรือด้านขวา โดยหางของเส้นโค้งไปทางด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้าน ในกรณีที่มีการแจกแจงของตัวแปรสุ่มเป็นการแจกแจงแบบเบ้ขวา ลักษณะของเส้นโค้งด้านขวามีหางยาวกว่าด้านซ้าย การแจกแจงแบบนั้นมีค่าฐานนิยมน้อยที่สุดตามด้วยค่ามัธยฐาน และค่าเฉลี่ย สำหรับการแจกแจงแบบเบ้ซ้าย ลักษณะของเส้นโค้งด้านซ้ายมีหางยาวกว่าด้านขวา การแจกแจงแบบนั้นจะมีค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุดตามด้วยค่ามัธยฐานและค่าฐานนิยมจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากบางครั้งพบว่าเวลาของกิจกรรมมีลักษณะการแจกแจงแบบไม่ปกติ เป็นลักษณะการกระจายหางยาวด้านขวา การกระจายของข้อมูลกระจุกตัวอยู่ทางด้านซ้าย เช่น ระยะเวลาที่สามารถทำงานเสร็จได้โดยส่วนมาก นอกจากนี้ผู้วิจัยนำการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรมประยุกต์ใช้กับข้อมูลของโครงการก่อสร้างห้องสะอาดของโรงงานยานยนต์

แห่งหนึ่ง [9] ซึ่งระบบปรับอากาศของห้องสะอาดเป็นส่วนสำคัญในการช่วยรักษาความสะอาดของอากาศภายในพื้นที่ปฏิบัติงาน นำไปสู่การเพิ่มคุณภาพทางการผลิต การวางแผนและควบคุมด้วยการจัดตารางเวลางานก่อสร้างถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการบริหารโครงการให้ประสบผลสำเร็จตามระยะเวลาแล้วเสร็จของโครงการที่กำหนดและใช้ต้นทุนที่น้อยที่สุด

2. วิธีในการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนในเทคนิคการประเมินค่าและควบคุมโครงการ

2.1 วิธีประมาณแบบ PERT

เทคนิค PERT ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ.1959 [10] โดยความร่วมมือของเจ้าหน้าที่โครงการพิเศษจากกองทัพเรือสหรัฐและบริษัท Lockheed และบริษัท Booz-Allen and Hemiltion เป็นเทคนิคเชิงปริมาณด้านการวิเคราะห์ข่ายงานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวางแผนและควบคุมงานที่มีลักษณะเป็นงานโครงการ ซึ่งสูตรในการประมาณค่าเฉลี่ยของเวลาในการทำโครงการของเทคนิคการประมาณแบบ PERT โดยการใช้การประมาณเวลาทั้ง 3 ค่า คือ

$$\hat{\mu}_1 = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (1)$$

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{(b - a)^2}{6^2} \quad (2)$$

2.2 วิธีประมาณ PERT แบบปรับปรุง

ในปี ค.ศ. 2000 David Vose [11] นำเสนอเทคนิค PERT แบบปรับปรุงซึ่งได้รับการยอมรับอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความเสถียรและยืดหยุ่นมากกว่าเทคนิค PERT สูตรในการประมาณค่าเฉลี่ย



ของเวลาในการทำโครงการของเทคนิคการประมาณแบบ PERT แบบปรับปรุง คือ

$$\hat{\mu}_2 = \frac{a + \gamma m + b}{\gamma + 2} \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_2^2 = \frac{(\hat{\mu}_2 - a)(b - \hat{\mu}_2)}{\gamma + 3} \quad (4)$$

โดยที่ γ แทน พารามิเตอร์ขนาด ซึ่งใช้วิธีภาวน่าจะเป็นสูงสุดในการประมาณค่าพารามิเตอร์

2.3 วิธีการประมาณการแจกแจงปกติ

ในปี ค.ศ. 1999 Cottrell [12] ได้มีการนำเสนอวิธีในการประมาณค่าเวลากิจกรรมโดยใช้การแจกแจงแบบปกติมาพัฒนาให้มีสูตรการคำนวณมีความซับซ้อนน้อยลง โดยใช้การประมาณเวลาทั้ง 2 ค่ากรณีประมาณเวลา a และ m โดยที่ $z^* = 3.44$ สูตรในการประมาณค่าเฉลี่ยของเวลาในการทำโครงการของเทคนิควิธีการประมาณการแจกแจงปกติ คือ

$$\hat{\mu}_3 = m \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_3^2 = \left(\frac{m - a}{z^*}\right)^2 \quad (6)$$

กรณีประมาณเวลา b และ m โดยที่ $z^* = 3.44$ สูตรในการประมาณค่าเฉลี่ยของเวลาในการทำโครงการของเทคนิควิธีการประมาณการแจกแจงปกติ คือ

$$\hat{\mu}_4 = m \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_4^2 = \left(\frac{b - m}{z^*}\right)^2 \quad (8)$$

2.4 วิธีการประมาณการแจกแจงล็อกนอร์มัล

ในปี ค.ศ. 2007 S. Mohan และคณะ [8] ได้มีการนำเสนอวิธีในการประมาณค่าเวลากิจกรรมโดยใช้การแจกแจงแบบล็อกนอร์มัล กรณีประมาณเวลา a และ m โดยที่ $z = 3$ สูตรในการประมาณค่าเฉลี่ยของเวลาในการทำโครงการของเทคนิควิธีการประมาณการแจกแจงล็อกนอร์มัล คือ

$$\hat{\mu}_5 = \log(a) + z\hat{\sigma}_5 \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}_5^2 = \left(\frac{z}{2} - \left[\frac{z^2}{4} + \log\left(\frac{a}{m}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right)^2 \quad (10)$$

กรณีประมาณเวลา b และ m โดยที่ $z = 3$ สูตรในการประมาณค่าเฉลี่ยของเวลาในการทำโครงการของเทคนิควิธีการประมาณการแจกแจงล็อกนอร์มัล คือ

$$\hat{\mu}_6 = \log(b) - z\hat{\sigma}_6 \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}_6^2 = \left(-\frac{z}{2} + \left[\frac{z^2}{4} + \log\left(\frac{b}{m}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right)^2 \quad (12)$$

2.5 วิธีการประมาณการแจกแจงไวบูล

ในปี ค.ศ. 2009 L. Edward [5] ได้มีการนำเสนอวิธีในการประมาณค่าเวลากิจกรรมโดยใช้การแจกแจงแบบไวบูล ดังนี้

$$\hat{\mu}_7 = a + \theta^* \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta^*}\right) \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_7^2 = \theta^{*2} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta^*}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta^*}\right)\right)^2 \right] \quad (14)$$

โดยที่ θ^* แทน พารามิเตอร์ขนาด และ β^* แทน พารามิเตอร์รูปร่างของการแจกแจงไวบูล ซึ่งใช้วิธีภาวน่าจะเป็นสูงสุดในการประมาณค่าพารามิเตอร์



2.6 วิธีการประมาณของ Ginzburg

ในปี ค.ศ. 1988 Ginzburg [13] ได้มีการนำเสนอวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยของเวลาและความแปรปรวนดังนี้

$$\hat{\mu}_8 = \frac{2a + 9m + 2b}{1268} \quad (15)$$

$$\hat{\sigma}_8^2 = \frac{(b-a)^2}{1268} \left[22 + 81 \left(\frac{m-a}{b-a} \right) - 81 \left(\frac{m-a}{b-a} \right)^2 \right] \quad (16)$$

2.7 วิธีการประมาณของ Shankar และ Sireesha

ในปี ค.ศ. 2009 Shankar และ Sireesha [4] ได้มีการนำเสนอวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยของเวลาและความแปรปรวน ดังนี้

$$\hat{\mu}_9 = \frac{5a + 17m + 5b}{27} \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_9^2 = \frac{(b-a)^2}{35} \quad (18)$$

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล ในการสร้างข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป โดยใช้โปรแกรม R ทำซ้ำจำนวน 1,000 รอบ ผู้วิจัยมีการกำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัยไว้ดังนี้

1. กำหนดจำนวนกิจกรรมวิกฤต (r) ให้มีความแตกต่างกัน ตั้งแต่จำนวนกิจกรรมวิกฤตน้อย ๆ ไปจนถึงจำนวนกิจกรรมวิกฤตมาก ๆ โดยในที่นี้ผู้วิจัยกำหนดเท่ากับ 5, 10, 20, ..., 80, 90, 100
2. การสร้างข้อมูลในกิจกรรมวิกฤตโดยจำลองข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป โดยกำหนดให้

a แทน ขอบเขตล่างของเวลาที่เป็นไปได้ มี การแจกแจงเอกรูป (1,4)

b แทน ขอบเขตบนของเวลาที่เป็นไปได้ มี การแจกแจงเอกรูป (8,12)

α แทน พารามิเตอร์ที่แสดงรูปร่างของการ แจกแจงบีตา มีการแจกแจงเอกรูป (1,5)

k แทน พารามิเตอร์ที่กำหนดช่วงของ m มี การแจกแจงเอกรูป (1,2)

3. คำนวณค่าของตัวแปรระยะเวลาที่สามารถทำงานเสร็จได้โดยส่วนมาก (m) และพารามิเตอร์รูปร่างของการแจกแจงบีตา จากสมการ

$$m = \frac{b + ak}{k + 1} \quad (19)$$

$$\beta = \left(\frac{(b-a)(\alpha-1)}{m-a} \right) - (\alpha-2) \quad (20)$$

4. ประมาณค่าพารามิเตอร์ขนาดและพารามิเตอร์รูปร่างของเทคนิควิธีการประมาณ PERT แบบปรับปรุงและวิธีการประมาณแบบไวบูล โดยใช้วิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด
5. คำนวณค่าจริงของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรม จากสูตร

$$\mu = a + (b-a) \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta} \right) \quad (21)$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{(b-a)}{(\alpha + \beta)} \sqrt{\frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta + 1}} \right)^2 \quad (22)$$

6. คำนวณค่าประมาณของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรมด้วยเทคนิคการประมาณค่า 7 วิธี ได้แก่ วิธีการประมาณแบบ PERT (PT) วิธีประมาณโดยการแจก



แจกปกติ (NA) ที่ใช้ค่าประมาณเวลา a และ m วิธีประมาณโดยการแจกแจงปกติ (NB) ที่ใช้ค่าประมาณเวลา b และ m วิธีประมาณโดยการแจกแจงล็อกนอร์มัล (LA) ใช้ค่าประมาณเวลา a และ m วิธีประมาณโดยการแจกแจงล็อกนอร์มัล (LB) ใช้ค่าประมาณเวลา b และ m วิธีประมาณ PERT แบบปรับปรุง (MP) วิธีประมาณของ Ginzburg (GB) วิธีประมาณของ Shankar และ Sireesha (RS) และวิธีประมาณโดยการแจกแจงไวบูล (WB) ตามสมการที่ (1) – (18)

- นำค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนในแต่ละวิธีการประมาณเปรียบเทียบกับค่าจริง โดยใช้เกณฑ์ร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเฉลี่ย

$$\sum_{i=1}^{1,000} \frac{|\hat{\mu}_i - \mu_i|}{\mu_i} \times 100 \quad (23)$$

โดยที่ μ_i คือ ค่าเฉลี่ยของเวลากิจกรรมในรอบที่ i

$\hat{\mu}_i$ คือ ค่าประมาณของค่าเฉลี่ยของเวลา กิจกรรมในรอบที่ i

และเกณฑ์ร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเฉลี่ย

$$\sum_{i=1}^{1,000} \frac{|\hat{\sigma}_i^2 - \sigma_i^2|}{\sigma_i^2} \times 100 \quad (25)$$

โดยที่ σ_i^2 คือ ค่าเฉลี่ยของเวลากิจกรรมในรอบที่ i

$\hat{\sigma}_i^2$ คือ ค่าประมาณของค่าเฉลี่ยของเวลา กิจกรรมในรอบที่ i

- ทำซ้ำจำนวน 1,000 รอบ

- คำนวณร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแต่ละกรณี

4. ผลการวิจัย

จากตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของเวลากิจกรรมมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของแต่ละวิธีการประมาณค่าเป็นดังนี้

วิธี PT มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนกิจกรรมวิกฤตเพิ่มมากขึ้น

วิธี MP มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนกิจกรรมวิกฤตเพิ่มมากขึ้น แต่มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนที่เท่ากันเมื่อ $r = 70, 80, 90$ หลังจากนั้นค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ $r = 100$

วิธี NA และ วิธี NB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมที่เท่ากันในทุกจำนวนกิจกรรมวิกฤตและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนกิจกรรมวิกฤตเพิ่มมากขึ้นและมีค่าที่เท่ากันในกรณีของ $r = 60$ และ $r = 70$ กับกรณีที่ $r = 90$ และ $r = 100$

วิธี LA มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมมีแนวโน้มไม่คงที่ วิธี LB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลา กิจกรรมมีแนวโน้มลดลง เมื่อ $r = 5, 10, \dots, 40, 50$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง $r = 60, 70, 80, 90, 100$



วิธี WB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลง เมื่อ $r = 5, 10, \dots, 60, 70$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง $r = 80, 90, 100$

วิธี GB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมมีแนวโน้มไม่คงที่

วิธี RS มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลง เมื่อ $r = 5, 10, \dots, 60, 70$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ $r = 80$ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อ $r = 90, 100$

เมื่อเปรียบเทียบทุกวิธีการประมาณ พบว่า วิธี MP มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรมน้อยที่สุดและรองลงมาเป็นวิธี PT ดังรูปที่ 1

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมของแต่ละวิธีการประมาณค่า พบว่า

วิธี PT มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อ $r = 5, 10$ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ $r = 10$ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในช่วงของ $r = 20, 30, 40$ หลังจากนั้นเมื่อ $r = 50, 100$ มีค่าที่ลดลงจากค่าของจำนวนกิจกรรมวิกฤตก่อนหน้าและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงของ $r = 60, 70, 80, 90$

วิธี MP มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมที่มากที่สุด เมื่อ $r = 5$ หลังจากนั้นแนวโน้มที่ลดลงเมื่อ $r = 10, 20, \dots, 80, 90$

วิธี NA มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมมีแนวโน้มไม่คงที่ วิธี NB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความ

แปรปรวนของเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อ $r = 5, 10, 20$ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ $r = 30$ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงจากค่าของจำนวนกิจกรรมวิกฤตก่อนหน้าเมื่อ $r = 40, 50, 100$ และมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าของจำนวนกิจกรรมวิกฤตก่อนหน้าเมื่อ $r = 60, 70, 80, 90$

วิธี LA และ LB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมมีแนวโน้มไม่คงที่

วิธี WB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ $r = 5, 10, \dots, 60, 70$ และมีค่าลดลงเมื่อ $r = 80$ หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น อีกครั้งจากค่าของจำนวนกิจกรรมวิกฤตก่อนหน้าเมื่อ $r = 90$ และมีค่าลดลงเมื่อ $r = 100$ ซึ่งมีกรณีที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนที่เท่ากัน คือ $r = 30, 40$

วิธี GB มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ $r = 5, 10, \dots, 80, 90$ และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ $r = 100$

วิธี RS มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความแปรปรวนของเวลากิจกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อ $r = 5, 10$ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในช่วงของ $r = 20, 30, 40$ และเมื่อเปรียบเทียบทุกวิธีการประมาณ พบว่า วิธี MP เป็นวิธีที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนในการประมาณค่าน้อยที่สุดและรองลงมาเป็นวิธี GB ดังรูปที่ 2

ผู้วิจัยประยุกต์ใช้กับข้อมูลของโครงการก่อสร้างห้องสะอาดของโรงงานยานยนต์แห่งหนึ่ง [9] ระยะเวลากิจกรรมต่าง ๆ ภายในโครงการก่อสร้างห้องสะอาดของโรงงานยานยนต์ เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ย

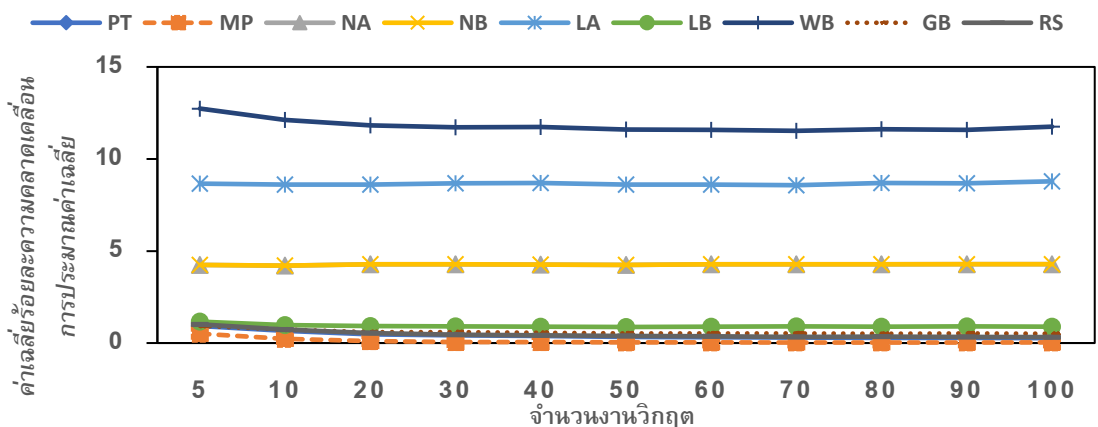


และความแปรปรวนของเวลาในกิจกรรมตามวิธีการของ PERT สมการที่ (1) และ (2) ดังตารางที่ 3 พบว่าเวลาแล้วเสร็จของโครงการเท่ากับ 27.33 วัน และความแปรปรวนเท่ากับ 5.56 วัน² และกิจกรรมวิกฤตของโครงการนี้ประกอบไปด้วยกิจกรรม B, D, I, M, N, O และ P ดังรูปที่ 1 เมื่อทำการประมาณค่าด้วย

เทคนิคการประมาณค่า 7 วิธี พบว่า ทุก ๆ วิธีการประมาณมีกิจกรรมวิกฤตของโครงการเช่นเดียวกับรูปที่ 3 และจากตารางที่ 4 พบว่า วิธี MP มีค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรมภายในโครงการน้อยที่สุด

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรม

r	PT	MP	NA	NB	LA	LB	WB	GB	RS
5	0.924	0.509	4.235	4.235	8.653	1.162	12.737	0.939	1.016
10	0.668	0.233	4.205	4.205	8.615	0.976	12.118	0.727	0.736
20	0.474	0.101	4.278	4.278	8.613	0.920	11.825	0.597	0.535
30	0.425	0.062	4.273	4.273	8.669	0.912	11.714	0.584	0.462
40	0.383	0.047	4.263	4.263	8.688	0.887	11.740	0.550	0.423
50	0.333	0.034	4.249	4.249	8.613	0.872	11.590	0.516	0.390
60	0.316	0.031	4.277	4.277	8.600	0.892	11.587	0.517	0.370
70	0.294	0.028	4.277	4.277	8.574	0.897	11.528	0.519	0.340
80	0.286	0.028	4.271	4.271	8.691	0.884	11.610	0.513	0.345
90	0.279	0.028	4.284	4.284	8.669	0.897	11.579	0.517	0.323
100	0.264	0.030	4.284	4.284	8.786	0.885	11.748	0.507	0.322

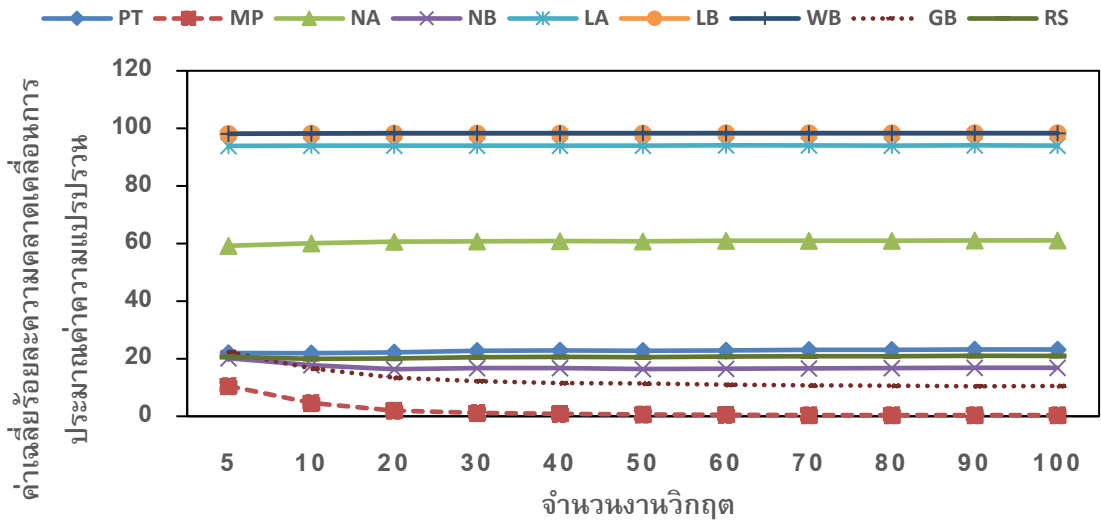


รูปที่ 1 ค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยเวลากิจกรรม



ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนเวลากิจกรรม

<i>r</i>	PT	MP	NA	NB	LA	LB	WB	GB	RS
5	21.943	10.517	59.238	20.174	93.923	98.178	98.117	22.257	20.598
10	21.900	4.673	60.079	17.780	94.018	98.248	98.242	16.664	19.961
20	22.232	1.926	60.689	16.354	94.043	98.273	98.304	13.408	20.082
30	22.741	1.149	60.779	16.732	94.052	98.290	98.325	12.162	20.555
40	22.861	0.823	60.857	16.701	94.046	98.288	98.325	11.522	20.666
50	22.754	0.594	60.806	16.474	94.059	98.288	98.337	11.399	20.547
60	22.919	0.516	60.984	16.522	94.079	98.292	98.342	11.002	20.717
70	23.056	0.435	61.015	16.690	94.082	98.294	98.348	10.731	20.858
80	23.092	0.427	61.001	16.782	94.056	98.297	98.345	10.684	20.895
90	23.207	0.419	61.085	16.852	94.071	98.299	98.349	10.420	21.013
100	23.181	0.456	61.063	16.846	94.035	98.298	98.337	10.488	20.986



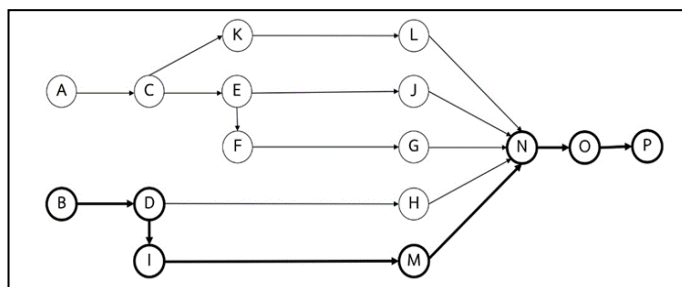
รูปที่ 2 ค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนเวลากิจกรรม

ตารางที่ 3 ข้อมูลโครงการก่อสร้างห้องสะอาดของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

กิจกรรม	ชื่อกิจกรรม	เวลากิจกรรม (วัน)	μ	σ^2
---------	-------------	-------------------	-------	------------

		<i>a</i>	<i>m</i>	<i>b</i>		
A	การออกแบบสร้างทางวิศวกรรม	1	2	3	2.00	0.67
B	การรวมกลุ่มดำเนินการของบุคลากร	2	3	4	3.00	0.67
C	สร้างแผงรับชั่วคราวและสำนักงานก่อสร้าง	2	3	4	3.00	0.67
D	งานการรื้อถอนและแก้ไขปรับปรุง	2	3	4	3.00	0.67
E	การสร้างพื้นของสำนักงานชั้นที่สอง	3	4	5	4.00	0.67
F	การติดตั้งโครงสร้างของเหล็ก	3	4	5	4.00	0.67
G	การติดตั้ง Pank 50 mm	1	2	3	2.00	0.67
H	การติดตั้งระบบไฟฟ้าหลัก	9	10	12	10.33	1.56
I	ก่อสร้างผนังและเพดานของห้อง	7	8	10	8.33	1.56
J	การติดตั้งระบบไฟฟ้าภายในห้อง	6	7	9	7.33	1.56
K	สร้างฐานของเครื่องปรับอากาศ	3	4	5	4.00	0.67
L	ติดตั้งระบบเครื่องปรับอากาศ	7	8	10	8.33	1.56
M	ติดตั้งม่านอากาศและประตูเหล็กม้วน	3	4	5	4.00	0.67
N	ทดสอบทั้งระบบ	4	5	6	5.00	0.67
O	ตรวจสอบความปลอดภัย	1	2	3	2.00	0.67
P	จัดส่งแบบแปลนที่ก่อสร้างจริง	1	2	3	2.00	0.67
ผลรวมของกิจกรรมวิกฤต					27.33	5.56

หมายเหตุ อักษรหนาแทนกิจกรรมวิกฤตภายในโครงการ



รูปที่ 3 ข่ายงานและเส้นทางวิกฤตของโครงการก่อสร้างห้องสะอาดของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์



ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของโครงการก่อสร้างห้องสะอาดของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

วิธีการประมาณ	PT	MP	NA	NB	LA	LB	WB	GB	RS
ค่าเฉลี่ย	0.61	0.30*	1.22	1.22	0.50	0.48	2.27	0.66	0.54
ความแปรปรวน	83.48	65.45*	89.14	85.06	88.54	67.84	89.01	80.44	83.01

หมายเหตุ อักษรหนาแทนค่าเฉลี่ยร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

5. บทสรุป

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรมในโครงการ โดยใช้ร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ เมื่อกำหนดจำนวนกิจกรรมวิกฤตเท่ากับ 5, 10, 20, ..., 80, 90 และ 100 กิจกรรม ทำการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล ทำซ้ำจำนวน 1,000 ครั้ง ในแต่ละสถานการณ์ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้ วิธีการประมาณ PERT แบบปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับทุกวิธีการประมาณค่า และมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนกิจกรรมวิกฤต (r) เพิ่มขึ้นในช่วง 5 ถึง 50 กิจกรรม แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อจำนวนกิจกรรมวิกฤต (r) อยู่ในช่วงมากกว่า 50 กิจกรรมขึ้นไป วิธีการประมาณแบบปกติ (a, m) และ (b, m) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนที่เท่ากันในทุกกรณีเนื่องจากมีสูตรในการประมาณค่าที่เหมือนกัน วิธีการประมาณการแจกแจงล็อกนอร์มัล (a, m) จะมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนไม่คงที่ การเพิ่มขึ้นของจำนวนกิจกรรมวิกฤต (r) ไม่ส่งผลต่อค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยและความ

แปรปรวนของโครงการ เช่นเดียวกับ วิธีการประมาณการแจกแจงล็อกนอร์มัล (b, m) วิธีประมาณของ Ginzburg วิธีประมาณของ Shankar และ Sireesha จะมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนไม่คงที่

โดยการใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยของร้อยละค่าความคลาดเคลื่อน พบว่า วิธีการประมาณ PERT แบบปรับปรุงเป็นวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของเวลากิจกรรมภายในโครงการได้ดีที่สุด สำหรับการทดลองในทุกสถานการณ์ที่ทำการศึกษาและรวมถึงข้อมูลที่นำมาประยุกต์ใช้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Paulo [14] ที่นำเสนอไว้ว่าวิธีการประมาณ PERT แบบปรับปรุงเป็นวิธีที่แนะนำให้ใช้ในการประมาณค่าของโครงการมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีการประมาณที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ควรมีการการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าที่ได้จากการแจกแจงอื่น ๆ เช่น การแจกแจงแกมมา การแจกแจงเออแลง เนื่องจากเป็นการแจกแจงที่ลักษณะเบ้ขวาซึ่งอาจจะทำให้มีประสิทธิภาพในการประมาณค่าเวลากิจกรรมในข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ขวาได้ดี เพื่อให้เป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการศึกษาในข้อมูลที่มีลักษณะเบ้ซ้าย



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Vanichbuncha, Quantitative analysis, 1st Ed., Faculty of commerce and accountancy, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2010. (in Thai)
- [2] P. Lalitaporn, Critical path national geographic national method and PERT program evaluation and review technique, 5th Ed., Technology Promotion Association (Thailand-Japan), Bangkok, Thailand, 1998. (in Thai)
- [3] I.M. Premachandra, An approximation of the activity duration distribution in PERT, Computers and Operations Research, 2001, 28(5), 443-452.
- [4] N.R. Shankar and V. Sireesha, An approximation for the activity duration distribution supporting original PERT, Applied Mathematical Sciences, 2009, 3(57), 2823-2834.
- [5] E.L. McCombs, M.E. Elam and D.B. Pratt Estimating task duration in PERT using the weibull probability distribution, Journal of Modern Applied Statistical Methods, 2009, 8(1), 282-288.
- [6] J. Fente, C. Schexnayder and K. Knutson, Defining a probability distribution function for construction simulation, Journal of Construction Engineering and Management, 2000, 126(3), 234-241.
- [7] V. Sireesha and N.R. Shankar, Analysis of time estimates on right skewed distribution of activity times in PERT, Journal of Statistics and Mathematics, 2011, 2(1), 15-22.
- [8] S. Mohan, M. Gopalakrishnan, H. Balasubramanian and A. Chandrashekar, A lognormal approximation of activity duration in PERT using two time estimates, Journal of the Operational Research Society, 2007, 58(6), 827-831.
- [9] B. Nadondu and N. Sriputtha, Study on cleanroom construction project by applying the techniques of program evaluation and review (PERT)/critical path method (CPM): A case study of automotive assembly plant, The 5th Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2020 (RMTC 2020), Proceeding, 2020, 227-233 (in Thai)
- [10] D.G. Malcolm, J.H. Roseboom, C.E. Clark and W. Fazar, Application of a technique for research and development program evaluation, Operations Research, 1959, 7(5), 646-669.
- [11] D. Vose, Risk analysis - A quantitative guide, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Chichester, US, 2000.



- [12] W.D. Cottrell, Simplified program evaluation and review technique (PERT), Journal of Construction Engineering and Management, 1999, 15(1), 16-22.
- [13] D.G. Ginzburg, On the distribution of activity time in PERT, Journal of the Operational Research Society, 1988, 39(8), 767–771.
- [14] P. Buchsbaum, Modified pert simulation, <http://greatsolutions.com.br/images/betaeng.pdf> (Accessed on 16 December 2022)



การพัฒนาเตาฟืนประสิทธิภาพสูงบนพื้นฐานการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CFD

ราชันย์ วงษ์ทวี และ ไทยทัศน์ สุดสวนสี*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thaithat.su@ksu.ac.th

วันที่รับบทความ: 24 พฤษภาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 24 สิงหาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 29 สิงหาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: ในประเทศไทยเตาฟืนเป็นที่นิยมใช้สำหรับการหุงต้มในครัวเรือนตามแหล่งชุมชน เนื่องจากฟืนเป็นวัสดุที่หาง่ายและมีความยั่งยืนในการทำเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาขนาดเล็ก ปัญหาหลักของเตาฟืนที่พบบ่อยคือมีการให้พลังงานความร้อนต่ำ ใช้เวลาในการหุงต้มนาน ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ และยังก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้แก่ควันไฟที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณที่สูง ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาเตาฟืนแบบดั้งเดิมให้มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยมีขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยการศึกษากระบวนการของการเผาไหม้ ปฏิบัติการเผาไหม้ และการแลกเปลี่ยนความร้อนของฟืน การออกแบบพัฒนาเตาฟืนให้มีการไหลของอากาศที่ดีขึ้นช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และการจำลองด้วยเทคนิค CFD (Computational Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาผลของการไหลของอากาศและผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ผลการศึกษาพบว่าเตาที่พัฒนาใหม่นี้มีความเสถียรทางด้านความร้อนจากฟืน ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางการให้ความร้อนที่สูงขึ้น โดยมีค่ากำลังงานความร้อนที่ใช้ต้มน้ำและมีประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น 106% และ 8.7% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเตาฟืนแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: เตาฟืน; CFD; การเผาไหม้

High-efficiency Wood Stove Development Based on CFD Analysis

Rachan Vongtavee and Thaitat Sudsuansee*

Division of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding author, E-mail: thaitat.su@ksu.ac.th

Received: 24 May 2022; Revised: 24 August 2022; Accepted: 29 August 2022

Online Published: 18 December 2022

Abstract: According to community sources, firewood stoves are still widely used in households in Thailand for cooking because it is a convenient and sustainable fuel source for small stoves. The firewood stoves' primary problem is poor heating capacity, which makes the cooking take a long time, uses a lot of fuel, and produces a lot of air pollution, including smoke from combustion. Increasing the efficiency of the stoves is the objective of this research. The focus is on the heat exchange and combustion processes to enhance the firewood stove. The development of the new firewood stove uses the simulation based on CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques to investigate the effects of airflow and temperature rise on combustion chambers to promote complete combustion. The comparison between a conventional stove and a newly-developed one is that it provides higher heating power and heating efficiency of 106% and 8.7% respectively.

Keywords: wood stove; CFD; combustion



1. บทนำ

การเผาไหม้ของฟืนเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานที่สำคัญและได้รับความนิยมมากในครัวเรือนโดยเฉพาะชุมชนชนบท เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่หาง่ายและพบได้ทั่วไป จึงมีงานวิจัยที่พยายามนำการศึกษาและนำไปใช้ประโยชน์โดยมีจุดมุ่งหมาย เพื่อลดการปล่อยมลพิษ ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้ของวัสดุชีวมวลที่มีประสิทธิภาพจะทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่เท่ากับการดูดซับของพืชจากกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งทำให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้น

การออกแบบและพัฒนาเตาฟืนมีประเด็นในการพิจารณาหลายอย่างเช่นทางด้านเศรษฐกิจ, สิ่งแวดล้อม และโดยเฉพาะประเด็นที่จูงใจให้มีความพยายามในการพัฒนาเตาฟืนคือด้านสุขภาพ [1,2] มหาวิทยาลัย Sokoine ประเทศแทนซาเนีย ได้พัฒนาเตาที่สร้างขึ้นโดยใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นเป็นเชื้อเพลิง โดยสามารถประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้ 30% [3,4] ข้อเสียที่สำคัญของเตาคือมันให้ความร้อนไม่เพียงพอ [4] โครงการ Kenya Ceramic Jiko (KCJ) เป็นโครงการที่ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเตาในภูมิภาคแอฟริกาตะวันออก [5] ซึ่งรายงานว่าสามารถผลิตความร้อนที่ใช้ในการหุงต้มได้ประมาณ 25-40% ของความร้อนจากเชื้อเพลิง เพิ่มขึ้นจากเดิมที่เกิดขึ้นได้เพียง 5-10% เท่านั้นจากเปลวไฟสู่ม้อหุงต้ม George [6] ค้นพบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาโคลนแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นเตาหนักรูปถ้วยทรงเรียวยาวสำหรับหม้อหุงต้มด้วยดินเหนียวที่หาได้ในท้องถิ่นและเคลือบด้วยส่วนผสมของดินเหนียวมูลวัว โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 17.9% เตา Angethi ใช้สำหรับ

ถ่านอัดแท่งและถ่านอัดแท่ง และทำด้วยถังเหล็กอบสังกะสี โคลน/คอนกรีต และตะแกรง มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 17.5% ซึ่งเทียบได้กับ (15.3%) งานวิจัยของ Wazir [7]

เตาฟืนมีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการมาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่การลองผิดลองถูกหรือใช้หลักการออกแบบซ้ำๆ ไปจนถึงการใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ที่ซับซ้อนมากขึ้น รวมถึงการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วย เช่น การวิเคราะห์องค์ประกอบของไฟไนต์และพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [8] วิธีการของการประเมินสมรรถนะของเชื้อเพลิง/เตาแบบผสมผสานได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [9] การพัฒนาวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเตา [8] สำหรับในประเทศไทย เตาผลิตก๊าซชีวมวลที่ได้รับความนิยมคือเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลขึ้นหรือเตาชีวมวลทรงกระบอกซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาโดย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี [10] ซึ่งเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาของงานวิจัยครั้งนี้

มีงานวิจัยที่นำเทคนิค CFD มาช่วยในการวิเคราะห์การไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ถูกเผาไหม้ภายในเตาอยู่หลายงาน Koraiem et al [11] ได้ทำการอธิบายแบบจำลองของการเผาไหม้ในเตาฟืน Ali et al [12] ได้นำเทคนิค CFD มาช่วยในการพัฒนาเตาชีวมวลในด้านการลดมลพิษและปรับปรุงการถ่ายโอนความร้อน Kantová et al. [13] ทำการจำลองการไหลด้วย CFD มาช่วยในการปรับปรุงทางไหลเข้าของอากาศกับเชื้อเพลิงชีวมวลแบบพาร์ทิเคิลในเตาเผา และ Hailu [14] ทำการพัฒนาเตาจรวด (Rocket Stove) โดยใช้เทคนิค CFD มาช่วยในการปรับปรุงด้านการบริโภคพลังงาน



วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือพัฒนาเตาเผาโดยใช้เทคนิค CFD มาช่วยในการวิเคราะห์การไหล เพื่อให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพและให้ค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น โดยอยู่บนพื้นฐานของการออกแบบที่ทำให้ผู้ใช้มีความสะดวกและมีต้นทุนต่ำในการผลิตเพื่อนำไปใช้ในครัวเรือนและชุมชน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล [10]

ชีวมวลมีสภาพเป็นของแข็ง ส่วนประกอบหลักเป็นคาร์บอน กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยความร้อนทำการเปลี่ยนรูปชีวมวลจากของแข็งให้กลายเป็นก๊าซชีวมวล มีส่วนประกอบหลักคือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน โดยอาศัยออกซิเจน (O_2) หรือ ไอน้ำ (H_2O) เป็นตัวออกซิไดซ์ในการเกิดปฏิกิริยา กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลสามารถจำแนกออกเป็นโซนของการทำปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

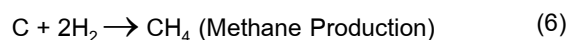
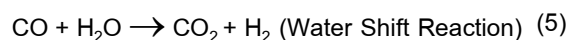
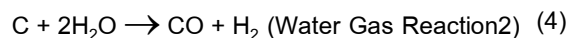
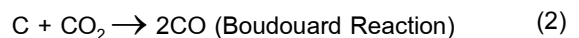
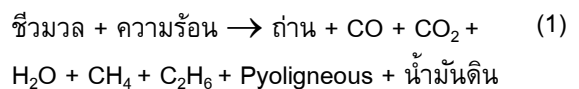
1. โซนการอบแห้ง (Drying Zone) โซนนี้ใช้อุณหภูมิประมาณ $100-200^{\circ}C$ สำหรับทำให้ความชื้นในเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการระเหยเป็นไอน้ำ ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงแห้ง โดยในโซนนี้สารระเหยยังไม่เกิดการสลายตัวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำเกินไป

2. โซนการกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) โซนนี้มีอุณหภูมิ $200 - 500^{\circ}C$ สามารถสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงโดยสารอินทรีย์ที่ได้ ประกอบด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน และสารที่มีสภาพเป็นของแข็ง คือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ดังปฏิกิริยาในสมการที่ (1)

3. โซนรีดักชัน (Reduction Zone) อุณหภูมิโซนนี้อยู่ที่ $500 - 900^{\circ}C$ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา

ลดความร้อน (Reduction Reaction) คือการทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับถ่านคาร์บอนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 5 ประเภทดังสมการที่ (2) – (6)

4. โซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) โซนสำหรับการเผาไหม้และนำความร้อนที่ได้ไปใช้ประโยชน์ อาจเรียกว่าเป็นโซนออกซิเดชัน (Oxidation Zone) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศและคาร์บอนกับไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง โดยสมการปฏิกิริยาที่ได้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

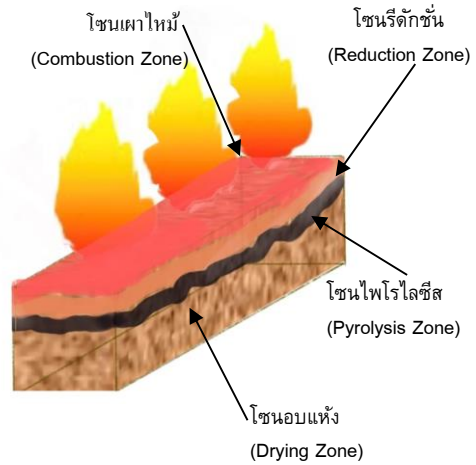


2.2 การเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล [10]

ลักษณะการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลในระยะแรกจะเป็นการเผาไหม้บริเวณผิวของแท่งเชื้อเพลิง เป็นลักษณะการเผาไหม้แบบตรง (Direct Combustion) จนกระทั่งผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ $1,000-1,200$ องศาเซลเซียส จะเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ใน



แห้งเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 1 โดยบริเวณด้านนอกเป็นโซนการเผาไหม้ ถัดเข้าไปเป็นโซนรีดักชัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโซนนี้เป็นก๊าซ CO, H₂ และ CH₄ ในโซนถัดไป ความร้อนที่เหลือจากกระบวนการรีดักชันผลทำให้ อุณหภูมิลดลงอยู่ในโซนไพโรไลซิสซึ่งเป็นโซนที่ทำให้ไม้กลายเป็นถ่าน (คาร์บอน) และโซนในสุดเป็นโซนอบแห้งอุณหภูมิที่เกิดจากความร้อนที่เหลือจากกระบวนการไพโรไลซิส เป็นโซนที่ทำให้ชีวมวลแห้ง โดยการระเหยไอน้ำออก



รูปที่ 1 โซนการเผาไหม้ของฟืน

2.3 สมการสำหรับการเผาไหม้

2.3.1 สัดส่วนของผสม (Mixture Fraction)

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองของการเผาไหม้แบบ Non-premixed [15] ซึ่งสถานะของของไหลในสมการจะสัมพันธ์กับตัวแปรเชิงสเกลาร์ที่กำหนดเรียกว่า สัดส่วนของผสม (Mixture Fraction, f) สามารถเขียนในรูปของสัดส่วนมวลของแต่ละองค์ประกอบดังสมการที่ (9)

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (9)$$

เมื่อ Z_i คือสัดส่วนมวลของสารประกอบตัวที่ i และ ox หมายถึงค่าของตัวทำออกซิไดซ์ (oxidizer) ที่สภาวะทางเข้า และ $Fuel$ หมายถึงค่าของเชื้อเพลิงที่สภาวะทางเข้า

2.3.2 สมการการถ่ายโอน (Transport Equation)

สมการถ่ายโอนของสัดส่วนของผสมสามารถพิจารณาได้จากสมการสัดส่วนของผสม ความหนาแน่นเฉลี่ย Favre, (Favre Mean (Density-Averaged) Mixture Fraction Equation) ดังสมการที่ (10) และ (11)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (11)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของผสม

\bar{v} คือ เวกเตอร์ความเร็วของผสม

μ_t คือ Turbulent Viscosity

σ_f คือ Turbulent Prandtl/Schmidt Number

\bar{f} คือ Favre Mean (density-averaged)

mixture fraction และ $f' = f - \bar{f}$

$\overline{f'^2}$ คือ Mixture Fraction Variance

C_g, C_d คือค่าคงที่ มีค่า 2.86 และ 2.0

ตามลำดับ (ค่าได้จาก Jones et al., [16])

ε คือ Turbulence Dissipation Rate

k คือ Turbulence Kinetic Energy



2.3.3 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของผสมชั่วขณะ

สัดส่วนของผสมชั่วขณะ (Instantaneous Mixture Fraction, F) กับ สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบ, ความหนาแน่นและอุณหภูมิสำหรับในระบบที่เป็นแบบ แอเดียแบติก (Adiabatic) และมีสัดส่วนของผสมชนิดเดียว ค่าที่เกิดขึ้นชั่วขณะ (Instantaneous Values) ของ สัดส่วน มวล, ความหนาแน่น และอุณหภูมิขึ้นอยู่กับหรือเป็นฟังก์ชันกับสัดส่วนของผสมชั่วขณะ, F เพียงอย่างเดียว ดังสมการที่ (12)

$$\phi_i = \phi_i(f) \quad (12)$$

เมื่อ ϕ_i คือค่าที่เกิดขึ้นชั่วขณะ และตัวห้อย

i คือสัดส่วนมวล, ความหนาแน่น และอุณหภูมิ

2.3.4 การหาค่าปริมาณสสารเฉลี่ยจาก สัดส่วนของผสมชั่วขณะ

ค่าความหนาแน่น, สัดส่วนมวลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสารประกอบ และค่าอุณหภูมิ (เป็นระบบแบบ แอเดียแบติก) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (13)

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (13)$$

โดย $p(f)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่นแบบสุ่ม (Probability Density Function, PDF) [15] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าสัดส่วนของผสมเฉลี่ย \bar{f} , กับค่าความแปรปรวนของมัน \bar{f}'^2 โดยในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันแบบ β -function PDF [15] ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (14) - (16)

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} df} \quad (14)$$

ซึ่ง

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} - 1 \right] \quad (15)$$

และ

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} - 1 \right] \quad (16)$$

3. ระเบียบวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบเตาฟืน

3.1.1 เตาฟืนแบบดั้งเดิม

จากการลงพื้นที่สำรวจข้อมูลของกลุ่มทอผ้าพื้นเมืองสิทธรรชาติบ้านดงน้อย ตำบลห้วยโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ พบปัญหาชาวบ้านใช้เตาอังโล่ทำจากวัสดุปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 2 มาต้มน้ำ ย้อมสีผ้าฝ้ายจากวัสดุธรรมชาติ ซึ่งเตาอายุการใช้งานน้อยประมาณ 1 เดือน มีการแตกร้าวชำรุด ผุพัง เนื่องจากต้องใช้เวลานานเพื่อให้ได้สีจากเปลือกไม้ที่เข้มข้นใช้เวลาในการต้มเคี่ยวสีจากเปลือกไม้ นานประมาณ 3-4 ชั่วโมง ในแต่ละครั้ง อุณหภูมิความร้อนของน้ำจากการใช้เตาอังโล่เฉลี่ยประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เพื่อให้ได้อุณหภูมิน้ำย้อมที่สูง ชาวบ้านจำเป็นต้องใช้ไม้พื้นขนาดใหญ่ซึ่งต้องตัดจากป่าไม้ในชุมชนของบ้านดงน้อย เป็นการตัดไม้ทำลายป่าทำลายระบบนิเวศของชุมชน

จากปัญหาดังกล่าว นักวิจัยจึงได้พัฒนาเตาฟืนประสิทธิภาพสูง สามารถใช้เชื้อเพลิงขนาดเล็กหาได้ง่าย



แต่ได้อุณหภูมิความร้อนของน้ำใช้เวลาต้มประมาณ 1-2 ชั่วโมง ในการต้มเคียวสี และมีความเหมาะสม สำหรับการต้มน้ำ 80-90 องศาเซลเซียส ย้อมผ้าฝ้าย จากสีธรรมชาติโดยใช้ไม้พินขนาดเล็กที่สามารถหา ง่าย เช่น กิ่งแห้งของไม้ยางพารา เหง้ามันสำปะหลังที่ เหลือทิ้ง กิ่งไม้ไผ่และต้นกระถิน เพื่อทดแทนการตัด ไม้ขนาดใหญ่จากป่าของชุมชนลงน้อยมาทำพิน



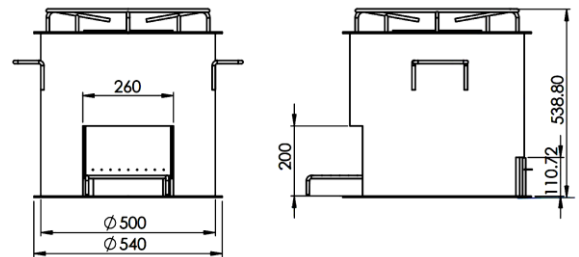
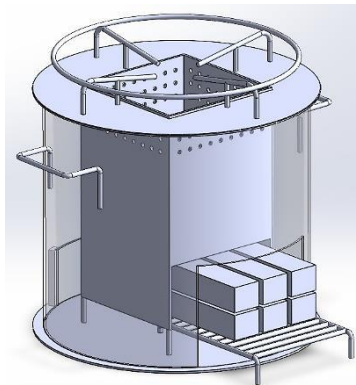
รูปที่ 2 เตาแบบดั้งเดิม

3.1.2 เตาพินที่พัฒนาใหม่

งานวิจัยบางงานมีการนำเอาเทคนิคของ CFD มาช่วยในการออกแบบเตานั้น [11–14] ซึ่งข้อดีคือ สามารถทำนายการไหลของอากาศและอุณหภูมิการ เผาไหม้ในห้องเผาไหม้ได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้นำ เทคนิค CFD มาช่วยในการปรับปรุงเตาพินในครั้งนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ไหลผ่าน ช่องรูเจาะที่ได้ออกแบบไว้ และดูผลของอุณหภูมิ ภายในห้องเผาไหม้และที่ทางออกของห้องเผาไหม้ซึ่ง เป็นอุณหภูมิที่ถูกนำไปใช้งานในการหุงต้มอาหาร

เตาพินที่พัฒนาใหม่ถูกปรับปรุงให้ดีกว่าเตา พินแบบดั้งเดิมในด้านของการให้ความร้อนที่สูงกว่า และใช้ปริมาณเชื้อเพลิงพินที่น้อยกว่าเดิม โดยมี หลักการในการออกแบบคือทำให้การเผาไหม้ภายใน เตามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ด้วยการทำให้มีอากาศ ส่วนหนึ่งมาช่วยในการเผาไหม้ในบริเวณทางออกของ ห้องเผาไหม้เรียกว่า อากาศส่วนที่สอง ซึ่งอากาศส่วน นี้ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณออกซิเจนในการเข้าไปผสมกับ เชื้อเพลิงเพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เตาถูกออกแบบให้มีรูปทรงมีหน้าตัดเป็น รูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3 ด้านนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.54 ม. x สูง 0.538 ม. ด้านในมีห้องเผาไหม้หน้าตัดเป็น ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดความกว้าง 0.26 ม. x สูง 0.5 ม.

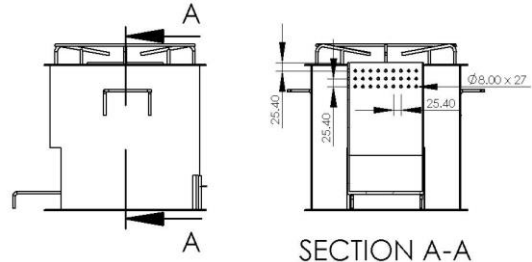


รูปที่ 3 แบบของเตาพินที่พัฒนาใหม่

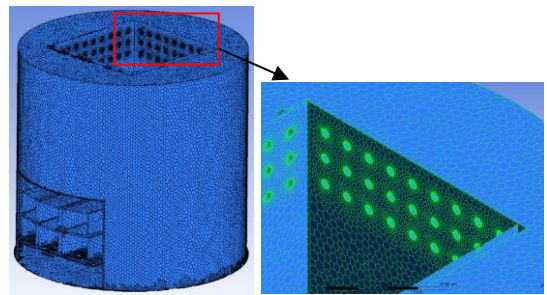
อยู่ตรงกึ่งกลางของเตา วัสดุที่ใช้ทำเตาเป็นแผ่นเหล็ก บางมีความหนา 3 มม. ฐานสำหรับวางเชื้อเพลิงอยู่ ด้านล่างของเตาและมีช่องสำหรับใส่พินเข้าไปในห้องเผา ไหม้อยู่ด้านข้าง ในช่องนี้ยังสามารถให้อากาศจาก ภายนอกเข้าไปในห้องเผาไหม้ได้



นอกจากนี้ ยังมีช่องบานเลื่อนสำหรับนำเชื้อเพลิง ออกอยู่ทางด้านตรงข้ามกับช่องใส่ฟืน ด้านบนของเตา ประกอบด้วยฐานรองสำหรับวางหม้อต้ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กกว่า ฐานรองหม้อหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อที่เล็กที่สุดที่ใช้กับเตานี้ ทั้งนี้เพราะต้องการให้ปริมาณ ความร้อนสูงสุดถูกส่งผ่านไปยังกันหม้อ ระยะห่าง ระหว่างฐานรองเชื้อเพลิงและฐานรองหม้อถูกเลือกให้ มีระยะที่พอดีกับเปลวไฟ ที่ห้องเผาไหม้ถูกเจาะรู ด้านข้างไว้เพื่อให้อากาศที่เข้ามาภายในเตาส่วนหนึ่ง ถูกส่งผ่านรูที่เจาะไว้ทางด้านบนของห้องเผาไหม้เพื่อ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตำแหน่งของรูเจาะในห้องเผาไหม้



รูปที่ 5 กริดของโดเมนการไหลในเตาฟืน

3.2 การจำลองการเผาไหม้ด้วย CFD

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเตาฟืนที่ใช้ในครัวเรือน ห้องเผาไหม้สามารถใส่ฟืนได้ประมาณ 5 kg มีรอบการ ใช้งานประมาณ 80 นาที เตาฟืนมีการใช้อากาศอยู่ 2 ส่วน ประกอบด้วย อากาศส่วนแรกสำหรับติดไฟ (Primary Air) และ อากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) อากาศส่วนแรกคืออากาศที่ไหลเข้าทางช่องใส่ฟืน ด้านล่างของเตาและไหลออกด้านบนห้องเผาไหม้ และ อากาศส่วนที่สองคืออากาศที่ไหลผ่านฟืนแล้วไหลขึ้นไปด้านข้างของเตาและไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้านบน ผ่านรูที่เจาะไว้ โปรแกรมที่ใช้คำนวณการเผาไหม้คือ ANSYS Fluent แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบ 3 มิติ โดยการคำนวณเป็นแบบสถานะคงตัว (Steady State)

3.2.1 การทำกริด (Grid) ที่เหมาะสมในการจำลอง

การทำกริดในเบื้องต้นได้ใช้วิธีสร้างกริดแบบสามเหลี่ยม (Tetrahedral) โดยเน้นโซนที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลสูงโดยเฉพาะในห้องเผาไหม้

บริเวณรูที่เจาะไว้ด้านบนของห้องเผาไหม้จะมีความหนาแน่นของกริดสูงกว่าบริเวณอื่น หลังจากการสร้างกริดแบบ Tetrahedral Mesh แล้วจึงนำไปแปลงเป็นกริดแบบ Polyhedral โดยผ่านโปรแกรม ANSYS Fluent [15] ดังรูปที่ 5 มีจำนวนของเซลล์ เท่ากับ 778,881 Polyhedral Cells และจำนวน Node เท่ากับ 3,619,589 Node ข้อดีของกริดแบบ Polyhedral คือมีความถูกต้อง, ความเสถียรและความเร็วในการคำนวณสูงกว่ากริดแบบ Tetrahedral [17-18]

3.2.2 การจำลองการเผาไหม้

การจำลองการไหล CFD ใช้แบบจำลองการไหลแบบเทอร์บีวเลนต์ k-epsilon [19] และแบบจำลองการเผาไหม้เป็นแบบ PDF Non-Premixed Combustion Model [15] เนื่องจากมีปัจจัย



ที่มีผลกระทบหลายอย่างในกระบวนการเผาไหม้ และเพื่อสะท้อนให้ได้กระบวนการเผาไหม้ที่เสมือนจริง ในการทำแบบจำลองจึงทำสมมติฐานให้ง่ายต่อการคำนวณ ดังนี้

- (1) ระหว่างการเผาไหม้ แก๊สเผาไหม้เป็นแบบแก๊สอุดมคติ ไม่คิดผลการขยายตัวทางความร้อนของอากาศ และไม่คิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างองค์ประกอบของแก๊ส
- (2) ผิวของผนังห้องเผาไหม้เป็นแบบอเดียแบติกที่อุณหภูมิคงที่ ไม่สิ้นไถล อุณหภูมิของอากาศเข้าห้องเผาไหม้มีค่าคงที่ และทั้งอุณหภูมิผนังและอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าเป็น 293 K
- (3) กระบวนการเผาไหม้เป็นแบบเผาไหม้ด้วยอากาศและก๊าซเชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน CH_4 และ CO
- (4) ก่อนการเผาไหม้ อากาศที่ไหลภายในมีสถานะคงตัว และพารามิเตอร์ของของไหลมีค่าคงที่

การจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นกระบวนการคำนวณแบบคงตัว (Steady) งานวิจัยของ Ayo [20] อากาศมีอัตราเชิงปริมาตรที่ทางเข้าเท่ากับ $1.5691 \times 10^{-2} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ซึ่งในงานวิจัยของ Ayo นี้ได้ทำการทดลองโดยควบคุมอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ทางเข้าโดยทำการทดลองในห้องทดลองซึ่งเหมือนกับการทดลองของงานวิจัยนี้ ซึ่งไม่มีการเพิ่มปริมาณลมหรือเครื่องเป่าลมเข้าไปยังห้องเผาไหม้ เพราะจะทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ของฟืน ดังนั้นอากาศที่เข้าไปยังห้องเผาไหม้จะเป็นอากาศที่ไหลเข้าเองโดยธรรมชาติ เนื่องจากอุณหภูมิและความดันของ

อากาศในห้องเผาไหม้กับอากาศจากภายนอกมีความแตกต่างกัน จึงทำให้อากาศร้อนในห้องเผาไหม้เกิดการไหลออกจากห้องเผาไหม้ทางด้านบนของเตา ในขณะที่เดียวกันอากาศจากภายนอกจะถูกดูดเข้ามาในห้องเผาไหม้โดยมีอัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออกและอัตราการเผาไหม้เชิงมวลของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 2.4913gs^{-1} แท่งฟืนเชื้อเพลิงมีส่วนประกอบเชิงมวลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบเชิงมวลของแท่งฟืนเชื้อเพลิง [10]

C	H	O	N	S
51.8%	5.7%	40.9%	0.1%	<0.01%

นอกจากนี้ ในการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดสภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) ในการไหลมีสภาวะที่ความดันในเตาเริ่มต้นที่ 1 atm และมีอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 27°C

3.3 การทดลองวัดค่า

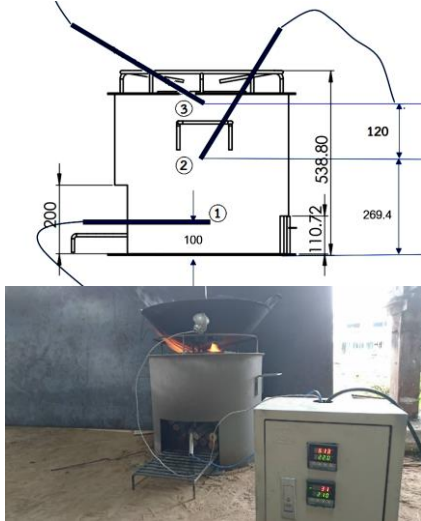
3.3.1 ฟืนที่ใช้ในการทดลอง

ฟืนที่ใช้ในการทดลองเป็นฟืนที่มาจากไม้ยางพารา ให้ค่าพลังงานความร้อนอยู่ที่ 6.57MJ/kg [21] เป็นฟืนที่มีความชื้นต่ำเนื่องจากผ่านการตากแห้งเป็นเวลา 14 วัน มีความชื้นประมาณร้อยละ 12 มีความหนาแน่นประมาณ 0.7 ถึง 0.74 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยขนาดของฟืนอยู่ที่ประมาณ 2 นิ้ว ความยาวประมาณ 1 ฟุต ในการป้อนเชื้อเพลิงจะป้อนเข้าทางด้านหน้าของเตาฟืน ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลองอยู่ที่ประมาณ 3 กก.



3.3.2 การวัดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

ทำการทดลองวัดค่าเตาพินต้นแบบที่ได้ถูกผลิตขึ้นโดยทำการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K ทำการวัดอุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ 3 จุด ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดลองวัดอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เตาพิน

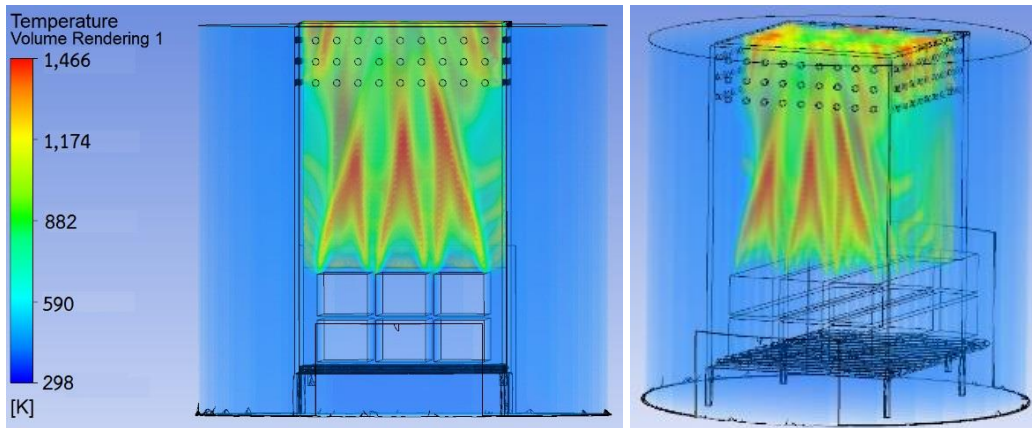
4. ผลการทดลอง

เตาพินถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของการจำลองการเผาไหม้ด้วยโปรแกรม CFD ในรูปที่ 7 แสดงถึงผลการจำลองโดยใช้การทำ Volume Rendering ของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ โดยจะสามารถเห็นลักษณะของเปลวไฟที่ออกมาจากเชื้อเพลิงพินที่อยู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ บริเวณที่เป็นสีอ่อนเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนบริเวณที่เป็นสีแดงเข้ม หมายถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งหมายถึงบริเวณที่มีเปลวไฟ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้อยู่ที่ประมาณ 800 องศาเซลเซียส ซึ่ง

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 7 นี้เกิดจากเชื้อเพลิงพินถูกให้ความร้อนจนถึงโซนของการเผาไหม้ (Combustion Zone) เกิดก๊าซเชื้อเพลิงออกมาจากพินและเผาไหม้กับอากาศที่เข้ามาผสมและเกิดเป็นเปลวไฟขึ้นในห้องเผาไหม้

ในรูปที่ 8 แสดงปรากฏการณ์ของการเผาไหม้แบบสองขั้นตอน ซึ่งจะเห็นว่าเปลวไฟที่ได้จากก๊าซเชื้อเพลิงของพินที่มาจากด้านล่างของห้องเผาไหม้ถูกผสมกับอากาศส่วนแรกที่เข้ามาจากทางเข้าของเตาพิน ทำให้พินติดไฟ ซึ่งในส่วนนี้จะมีระยะความสูงของเปลวไฟไม่ถึงปากปล่องของห้องเผาไหม้ เนื่องจากการผสมกันที่ยังไม่สมบูรณ์ของอากาศกับเชื้อเพลิง จึงต้องอาศัยอากาศส่วนที่สองที่มาจากช่องที่เจาะรูไว้ด้านบนเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ทางออกของห้องเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

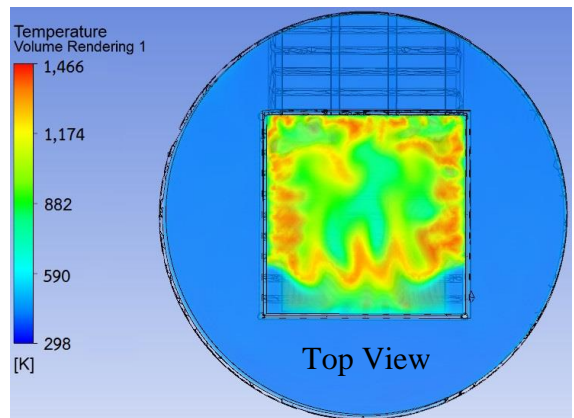
ในรูปที่ 9 เป็นการแสดงภาพคอนทัวร์ของอุณหภูมิ (Temperature Contour) ที่บริเวณหน้าต่างภายในห้องเผาไหม้ จะเห็นได้ว่าเปลวไฟที่เกิดจากอากาศส่วนที่สองที่มีส่วนทำให้อุณหภูมิบริเวณปากทางออกของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูง ช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์และเตาสามารถให้ความร้อนที่สูงขึ้น โดยในรูปที่ 9 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นส่วนที่นำความร้อนไปใช้ในการหุงต้ม ซึ่งบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงคือบริเวณที่เป็นสีแดง จะเห็นได้ว่าอยู่ล้อมรอบบริเวณตรงกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีเปลวไฟเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่สองจากช่องที่เจาะรูไว้ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 700 – 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 ผลการจำลองอุณหภูมิในห้องเผาไหม้



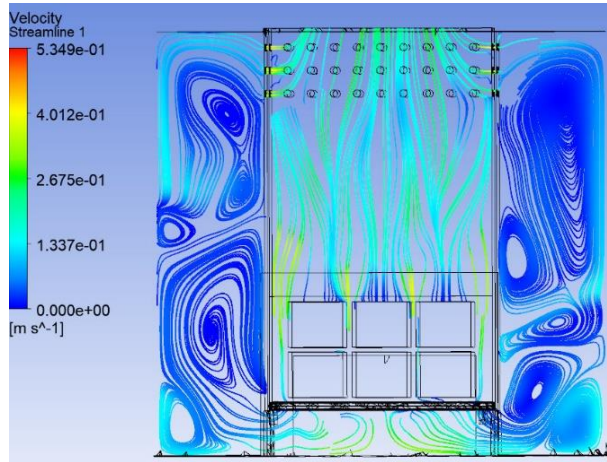
รูปที่ 8 ผลการจำลองอุณหภูมิในห้องเผาไหม้



รูปที่ 9 เฉดสีของอุณหภูมิบริเวณทางออก

ในรูปที่ 10 เป็นการแสดงพฤติกรรมการไหลโดยใช้เส้นการไหล (Stream Line) ของอากาศเข้ามาในเตาพินและไหลออกที่ทางออก โดยอากาศไหลเข้ามาทางช่องด้านล่างของเตา ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าอยู่ที่ 0.4 m/s อากาศส่วนที่หนึ่งไหลผ่านกองพินและไหลขึ้นไปยังห้องเผาไหม้เป็นอากาศที่ใช้ในการติดไฟ และอากาศส่วนที่สองไหลผ่านกองพินไปบริเวณรอบๆห้องเผาไหม้เกิดปรากฏการณ์การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ที่มีลักษณะการไหลเป็นแบบไหลวน

(Vortex Flow) ตามรูปที่ 10 ลักษณะของเส้นการไหลจะมีลักษณะหมุนวนเป็นรูปก้นหอย หลังจากนั้นอากาศถูกไหลเข้ามายังห้องเผาไหม้ตามช่องที่เจาะรูเอาไว้ โดยรอบซึ่งอากาศที่ไหลเข้ามาจะผสมกับก๊าซเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ ด้วยเหตุนี้ทำให้เตาที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนดีขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีควันน้อย และประหยัดเชื้อเพลิงเนื่องจากใช้เวลาในการหุงต้มที่สั้นลง



รูปที่ 10 ผลการเคลื่อนที่ของการไหลของอากาศในเตาฟืน

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของเตาฟืนจากการทดลองและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตำแหน่งการวัด	ค่าที่วัดได้จากการทดลอง*	ค่าที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์	% ความคลาดเคลื่อน
จุดที่ 1	676 °C	690 °C	2.07 %
จุดที่ 2	782 °C	797 °C	1.92 %
จุดที่ 3	765 °C	778 °C	1.70 %
เฉลี่ย	741 °C	755 °C	1.89%

*หมายเหตุ ทำการทดลองวัดหลังจากเริ่มเผาไหม้เป็นเวลา 30 นาที

ผลของการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงดังรูปที่ 3 โดยวัดค่าของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล type K ผลของการวัดในการทดลองและในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาแสดงไว้ดังตารางที่ 2 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการคำนวณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.89%

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิและเวลาในการต้มข้าวของเตาแบบดั้งเดิมกับเตาที่พัฒนาใหม่

เวลาในการต้ม (นาที)	จำนวนครั้งที่ทดลอง (ครั้ง)	อุณหภูมิของน้ำ \bar{x}	
		เตาแบบดั้งเดิม	เตาที่พัฒนาใหม่
5	5	35	40
10	5	60	86
15	5	63	97*
20	5	70	97
25	5	85	95
30	5	90	94
35	5	92*	93
40	5	85	89
45	5	82	87

*หมายเหตุ อุณหภูมิสูงสุดและน้ำเริ่มเดือด



เมื่อนำเตาแบบดั้งเดิมมาทดลองเปรียบเทียบกับเตาที่พัฒนาใหม่โดยทำการทดลองจับเวลาในการต้มน้ำปริมาณ 8 kg ให้เดือด และใช้พื้นที่มีน้ำหนักเท่ากันคือ 3 kg ผลการทดลองพบว่า เตาแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการต้มน้ำให้เดือดเท่ากับ 32 นาที ในขณะที่เตาที่พัฒนาใหม่ใช้เวลาในการต้มน้ำให้เดือดเท่ากับ 15 นาที ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเตาที่พัฒนาใหม่สามารถใช้เวลาในการหุงต้มที่สั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับเตาแบบดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาในด้านประสิทธิภาพการให้ความร้อนของเตานั้น สามารถคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำของเตาแต่ละชนิดได้จากสมการดังสมการที่ (17)

$$P = M_T C_p (T_2 - T_1) + M_R L \quad (17)$$

P คือค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ต้มน้ำ (J)

M_T คือมวลของน้ำทั้งหมด (kg)

C_p คือค่าความจุความร้อนของน้ำ (J/kg °C)

T_2 คืออุณหภูมิของน้ำก่อนต้ม (°C)

T_1 คืออุณหภูมิของน้ำหลังต้ม (°C)

M_R คือมวลของน้ำที่หายไป (kg)

L ความร้อนแฝงของน้ำ (J/kg °C)

และการหาประสิทธิภาพทางความร้อน (η) ของเตาพื้นนั้นสามารถหาได้จากสมการดังสมการที่ (18)

$$\eta = \frac{P}{M_f H_f} \times 100 \quad (18)$$

M_f คือมวลของเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้ (kg)

H_f คือค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

ในตารางที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบค่าต่างๆที่วัดได้จากการทดลองต้มน้ำเปรียบเทียบระหว่างเตาแบบดั้งเดิมและเตาที่พัฒนาใหม่ โดยค่าที่วัดได้นำไปแทนในสมการที่ (17) และ (18) เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตา โดยไม่ยากพาราให้ค่าพลังงานความร้อนอยู่ที่ 6.57 MJ/kg [21] ผลปรากฏว่าเตาที่พัฒนาใหม่มีกำลังงานความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำอยู่ 403.95 W/kg สูงกว่าเตาแบบดั้งเดิมอยู่ 106% และมีประสิทธิภาพทางความร้อน 31.62% สูงกว่าเตาแบบดั้งเดิมอยู่ 8.7% ตามลำดับ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทั้งสองแบบ

ค่าเฉลี่ย*	เตาพื้นแบบดั้งเดิม	เตาพื้นที่พัฒนาใหม่
มวลของน้ำเริ่มต้น	8 kg	8 kg
มวลเชื้อเพลิงเริ่มต้น	3 kg	3 kg
อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น	27 °C	27 °C
อุณหภูมิสูงสุดของน้ำ	92 °C	97 °C
เวลาที่น้ำเดือด, T_{boil}	32 นาที	15 นาที
อัตราเฉลี่ยของมวลของน้ำที่หายไปต่อเวลา*	11.56 g/min	16.67 g/min
อัตราเฉลี่ยของมวลเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้ต่อเวลา**	62.5 g/min	93.33 g/min
ค่ากำลังงานความร้อนต่อมวลของน้ำ	196.08 W/kg	403.95 W/kg
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	22.92%	31.62%

หมายเหตุ *ทำการทดลองตั้งแต่เริ่มต้มน้ำจนน้ำเดือด

**ทำการทดลองเผาไหม้จนเชื้อเพลิงกลายเป็นขี้เถ้า



จากตารางที่ 4 เห็นได้ว่าเตาที่พัฒนาใหม่มีค่าพลังงานความร้อนที่สูงกว่า ส่งผลทำให้อัตราของมวลน้ำที่หายไปสูงกว่า น้ำจึงเดือดเร็วและประหยัดเวลาที่ใช้ในการหุงต้ม นอกจากนี้เนื่องจากเตาที่พัฒนาใหม่ให้ค่าพลังงานความร้อนที่สูงกว่าจึงทำให้อัตราเฉลี่ยของมวลเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้ต่อเวลาสูงกว่าเตาแบบดั้งเดิม จึงดูเหมือนว่าเตาที่พัฒนาใหม่นี้บริโภคเชื้อเพลิงสูงกว่า แต่ด้วยเหตุที่มันใช้เวลาในการหุงต้มสั้นกว่าเตาแบบดั้งเดิมประมาณครึ่งเท่าตัว จึงทำให้การบริโภคเชื้อเพลิงน้อยกว่าเตาแบบดั้งเดิม

งานวิจัยนี้ได้มอบเตาประสิทธิภาพสูงที่ทำการเหล็กให้กลุ่มชาวบ้านย้อมผ้าฝ้ายจากสิทธรมชาติ บ้านดงน้อย ตำบลห้วยโพธิ์ อำเภอเมืองจังหวัดกาฬสินธุ์ได้ใช้งานจนถึงปัจจุบัน ชาวบ้านได้ยกเลิกการใช้เตาอั้งโล่ที่ทำจากปูนซีเมนต์ เพราะเตาแตกง่าย ให้ความร้อนต่ำ ใช้ไม้ฟืนขนาดใหญ่ มีควันไฟมารบกวนระบบการหายใจ สำลั้กควันไฟ มีกลิ่นเหม็นไหม้ ใช้งานไม่สะดวก โดยคณะผู้วิจัยได้ให้กลุ่มชาวบ้านชุมชนดงน้อยทดลองใช้งาน ซึ่งผลการใช้งานได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5 ปรากฏว่าผลการใช้งานเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากเตามีอายุการใช้งานนานกว่าเตาแบบดั้งเดิมและไม่แตกหักง่าย เนื่องจากโครงสร้างเป็นเหล็ก และเตาที่พัฒนาใหม่สามารถยังทำให้ใช้งานได้สะดวกเนื่องจากผู้ใช้งานไม่สำลั้กควัน สามารถหายใจได้สะดวก เพราะมีควันน้อยกว่าเตาแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 5 ผลการใช้งานเตาทั้งสองชนิด

ความทนทานของเตา	เตาแบบดั้งเดิม	เตาที่พัฒนาใหม่
	ประมาณ 1 เดือน	มากกว่า 6 เดือน
ความสะดวก	ไม่สะดวก	ใช้งานสะดวก
ในการใช้งาน	เพราะมีควันมาก	มีควันน้อย
	หายใจไม่สะดวก	ไม่สำลั้กควัน

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเตาฟืนประสิทธิภาพสูงบนพื้นฐานของการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค CFD ซึ่งเตาที่พัฒนาใหม่มีการออกแบบให้มีการไหลของอากาศสองส่วน คือส่วนของอากาศที่ทำการติดไฟเป็นส่วนหลัก และอีกส่วนหนึ่งอากาศส่วนที่สองซึ่งทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อากาศส่วนที่สองนี้จะไหลผ่านรูที่ทำการเจาะไว้บริเวณใกล้กับทางออกของห้องเผาไหม้ ผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CFD จะสามารถทำนายผลของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้และบริเวณทางออก รวมทั้งทำนายผลของการไหลของอากาศภายในเตาฟืนได้

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาเตาแบบดั้งเดิมให้มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นโดยใช้เทคนิค CFD มาช่วยในการวิเคราะห์การไหลซึ่งผลของการปรับปรุงเตาฟืนนี้สามารถให้ค่าความร้อนที่สูงขึ้นกว่าเตาแบบดั้งเดิมโดยเตาฟืนแบบใหม่นี้สามารถให้ค่ากำลังงานความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำและประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าเตาฟืนแบบดั้งเดิมอยู่ 106% และ 8.7% ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ยังมีส่วนที่ต้องปรับปรุงโดยพบว่าช่องอากาศที่ทางเข้าเตาฟืนนี้ยังไม่เหมาะสมนัก เนื่องจากการไหลภายในห้องเผาไหม้ยังไม่ทั่วถึงเท่าที่ควร บริเวณด้านหน้าห้องเผาไหม้จะเกิดการเผาไหม้น้อยกว่าด้านหลัง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดปรับปรุงช่องการไหลของอากาศเข้ามาในเตาฟืนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ในงานวิจัยครั้งหน้า



6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณทางสาขาวิชาวิศวกรรม
อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ในการสนับสนุน
ให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. K. Joseph, P. Krishna and H.B.V. Zann, Bringing stoves to the people, ACTS Press and the Foundation for Wood Stove Dissemination (FWD), Nairobi, Kenya, 1990.
- [2] S. Karekezi, The role of a stoves information network in addressing the indoor air pollution – an African perspective, Indoor air pollution from biomass fuel, Proceeding, 1992, 89-104.
- [3] E. Crewe, Morogoro fuel wood stove project - Review and recommendations, Intermediate Technology Development Group (ITDG), Rugby, UK, 1990.
- [4] T. Otiti, Improved stoves in Tanzania - Stove Notes 6, FWD and ACTS Press, Nairobi, Kenya, 1991.
- [5] D. M. Kammen and B. F. Kammen, Energy food preparation and health in Africa: The roles of technology education and resource management, African Technology Forum, 1992, 6(1), 11-14.
- [6] R. George, Commercialization of technology for domestic cooking applications in biomass energy systems, Tata Energy Research Institute (TERI), New Delhi, India, 1997.
- [7] S. Wazir, Evaluation of chulas, Thesis, Indian Institute of Technology, India, 1981.
- [8] N.L. Panwar, Performance evaluation of developed domestic cook stove with Jatropha shell, Waste and Biomass Valorization, 2010 1(3), 309-314.
- [9] P. Arora and S. Jain, A review of chronological development in cookstove assessment methods: Challenges and way forward, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55, 203-220.
- [10] <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib13842-%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%89%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%9A%E0%B8%B9%E0%B8%A3%E0%B8%93%E0%B9%8C.pdf> (Accessed on 14 Jan 2022)
- [11] M. Koraiem and D. Assanis, Wood stove combustion modeling and simulation: Technical review and recommendations, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 127.



- [12] H. Ali and T. Wei, CFD Study of an improved biomass cookstove with reduced emission and improved heat transfer characteristics, *Journal of Clean Energy Technologies*, 2017, 5, 427-432.
- [13] N.C. Kantová, S. Stadek, J. Jnadacka, A. Caja and R. Nosek, Simulation of biomass combustion with modified flue gas tract, *Applied Sciences*, 2021, 11(3), 1278.
- [14] G. Hailu, Product development using CFD simulation of energy efficient institutional bio-char rocket stove, *Journal of Energy Technologies and Policy*, 2018, 8, 22-28.
- [15] <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notamodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf> (Accessed on 9 Jan 2022)
- [16] W.P. Jones and J.H. Whitelaw, Calculation methods for reacting turbulent flows: A review, *Combustion and Flame*, 1982, 48, 1-26.
- [17] W. Wang, Y. Cao and T. Okaze, Comparison of hexahedral, tetrahedral and polyhedral cells for reproducing the wind field around an isolated building by LES, *Building and Environment*, 2021, 195, 107717.
- [18] M. Spiegel, T. Redel, Y.J. Zhang, T. Struffert, J. Hornegger, R.G. Grossman, A. Doerfler and C. Karmonik, Tetrahedral vs. polyhedral mesh size evaluation on flow velocity and wall shear stress for cerebral hemodynamic simulation, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2011, 14(1), 9-22.
- [19] S. Ruffin and J. Lee, Adaptation of a k-epsilon model to a C artesian grid based methodology, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2009, 3(3), 238-245.
- [20] S.A. Ayo, Design, construction and testing of an improved wood stove, *Assumption University Journal of Technology*, 2009, 13(1), 12-18.
- [21] T. Poomchai, T. Thonusin, C. Chotchutima, S. Janeweerawat and P. Maneesan, Evaluation of biomass production and properties energy of rubber wood, *Para Rubber Electronic Bulletin*, 2019, 40(4), 2-17.



ผลกระทบของการปรับตั้งจังหวะการฉีดน้ำมันไฟโรไลซิสจากพลาสติกผสมน้ำมันดีเซลที่มีต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษขอเครื่องยนต์ดีเซล

ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์^{1,2*} อรุษา ครุฑธาพันธ์^{1,2} กัมปนาท เทียนน้อย^{1,2}
ศิรินทร์ โกมลหิรัญ¹ สุนทร โฆษฐ์งาม^{1,2} และ มงคล แดงสุนทรชัย^{1,2}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE), สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่: E-mail: chonlakarn.w@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 ธันวาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 24 สิงหาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 5 กันยายน 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: ปัจจุบันพลังงานทางเลือกชนิดต่างๆ ถูกนำมาใช้เพื่อทดแทนน้ำมันจากปิโตรเลียมเพื่อลดการนำเข้าและใช้วัตถุดิบเหลือใช้และหมุนเวียนให้เกิดประโยชน์ โดยเฉพาะขยะพลาสติกที่มีจำนวนมากมหาศาล หนึ่ง มีงานวิจัยที่นำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นน้ำมันไฟโรไลซิสจากพลาสติกที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดีเซลและนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดต่างๆ จากงานวิจัยพบว่าน้ำมันไฟโรไลซิสมีค่าความร้อนและซีเทนัมเบอร์ ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล บทความนี้ศึกษาสมรรถนะและมลพิษของน้ำมันดีเซล B7 ผสมน้ำมันไฟโรไลซิส P100 ในอัตราส่วนที่ 50:50 P50 เทียบต่อปริมาตรของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยทำการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงล่วงหน้า ที่ 16.5 และ 17.5 องศา ก่อนศูนย์ตายบนที่ 1500 รอบต่อนาที ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและมลพิษที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ที่ทดสอบก่อนและหลังจากการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมัน พบว่าเมื่อปรับองศาการฉีดน้ำมันอยู่ที่ (16.5° BTDC) ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันไฟโรไลซิส P50 ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล B7 มากที่สุด เมื่อพิจารณาการปลดปล่อยมลพิษจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีปริมาณควันดำมีค่าที่ลดลง

คำสำคัญ: เครื่องยนต์ดีเซล; น้ำมันไฟโรไลซิสจากพลาสติก; การปรับตั้งองศาการฉีด

Effects of Injection Timing Adjustment of Plastic Pyrolysis Oil Blended with and Diesel Fuel on Performance and Emissions of Diesel Engine

Chonlakarn Wongkhorsub^{1,2*}, Anucha Krutthaphan^{1,2}, Kampanart Theinnoi^{1,2},
Seekharin Komolhirun¹, Soontorn Odngam^{1,2} and Mongkol Dansuuntornchai^{1,2}

¹ Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy (CTAE), Science and
Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author: E-mail: chonlakarn.w@cit.kmutnb.ac.th

Received: 1 December 2021; Revised: 24 August 2022; Accepted: 5 September 2022

Online Published: 18 December 2022

Abstract: Nowadays, different types of alternative energy are introduced to replace oil from petroleum products in order to reduce petroleum imports and utilize waste and reusable materials, in particular, a large amount of plastic waste. Thus, there is some research related to converting plastic waste into plastic pyrolysis oil. It appears that plastic pyrolysis oil has similar properties to diesel and has been tested on various sizes of diesel engines. However, pyrolysis oil has a heating value and Cetane number lower than diesel fuel. Therefore, this article studies the performance and pollution of diesel B7 mixed with pyrolysis oil P100 at a ratio of 50:50 P50. The advance injection timing is customized at 16.5°BTDC to 17.5°BTDC, 1500 rpm, 25%, 50% and 75% of the maximum engine load. The research aimed to compare the performance and pollution that occurred on the tested engine before and after adjusting the injection timing. It was found that when pyrolysis oil P50 was used and the injection timing was adjusted at 16.5°BTDC, the performance of the diesel engine was comparable to diesel B7. The emissions seem to be slightly increased compared with the diesel B7. However, the black smoke emitted from the plastic pyrolysis oil is slightly lower than the diesel oil.

Keywords: Diesel Engine; Plastic Pyrolysis Fuel; Injection Degree Adjustment



1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาขยะพลาสติกที่มีเป็นจำนวนมากของประเทศไทยมีปริมาณ 1.51 ล้านตันปี ใช้เวลานานในการย่อยสลาย และก่อให้เกิดปัญหาต่อแวดล้อมตั้งนั้น ทางกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จึงได้มีนโยบายการนำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis) เพราะในองค์ประกอบของขยะพลาสติกมีสารไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก [1] ที่สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิง

น้ำมันไพโรไลซิส คือน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast-Pyrolysis) จะเป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ 400-650 องศาเซลเซียส (°C) โดยปราศจากออกซิเจนภายในกระบวนการ ทำให้กระบวนการนี้สามารถผลิตน้ำมันประมาณ 60-75% และเป็นของแข็ง 15-25% และก๊าซที่ไม่กลั่นตัว 10-15% เทียบกับปริมาณที่ใส่ผลิตภัณฑ์เริ่มต้น [2] จากการศึกษาของงานวิจัยที่นำพลาสติกประเภท PS, PP และ PE มาเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าค่าความร้อนของพลาสติกที่นำมาวิจัยอยู่ที่ 40.2-45 MJ/kg มีความใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล [3] นอกจากนี้พลาสติกประเภท PP, HDPE, LDPE, PET, PVC และ PS ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส พบว่าค่าความร้อนอยู่ที่ 39.5-43 MJ/kg [4] ทำให้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลได้ โดยมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาน้ำมันไพโรไลซิสที่อัตราส่วนผสม 10%, 30%, 50%, 70%, และ 100% มาทดสอบกับการเพิ่มภาระงานของเครื่องยนต์ขึ้นครั้งละ 20% จนถึง 100% พบว่า

มีความล่าช้าในการฉีดเชื้อเพลิง (Retarded Injection Timing) เกิดขึ้นจึง ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลงตามอัตราส่วนผสมของน้ำมันไพโรไลซิสที่สูงขึ้น ทำให้มีการปลดปล่อยมลพิษที่ลดลง [5] และเมื่อทำการปรับตั้งองศาการฉีดให้ล่าช้า (Retarded Injection Timing) พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการปลดปล่อยมลพิษจากไอเสียที่ลดลงตามภาระงานที่เพิ่มขึ้น และมีปริมาณควันดำที่สูงขึ้น

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของน้ำมันดีเซล B7 ผสมน้ำมันไพโรไลซิส P100 ในอัตราส่วนที่ 50:50 P50 โดยทำการปรับองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงล่วงหน้า (Advance injection timing) ที่ 16.5 และ 17.5 องศา ก่อนศูนย์ตายบน (Before Top Dead Center, BTDC) โดยกำหนดให้ความเร็วรอบคงที่ที่ 1500 รอบต่อนาที (rpm) และทำการเปลี่ยนภาระงาน 25%, 50% และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะและมลพิษที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กหนึ่งสูบ 4 จังหวะ ซึ่งแสดงข้อมูลของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ ดังตารางที่ 1 โดยกำหนดภาระงานที่ทดสอบที่ 25%, 50% และ 75% ซึ่งมีไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน (Eddy Current Engine Dynamometer) ของ Hoffman รุ่น D3210 Elze 1 Type เพื่อควบคุมภาระงานของเครื่องยนต์ที่ทดสอบ โดยมีการวัดความดันภายในกระบอกสูบจะใช้ (Pressure Transducer) ของ

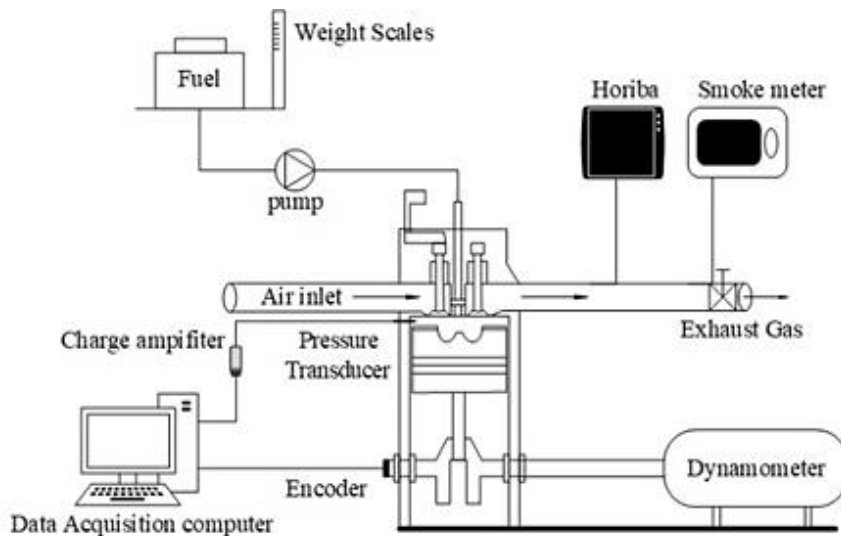


Kistler รุ่น 6056A ที่ติดตั้งอยู่บนฝาสูบของเครื่องยนต์ ซึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ (Charge Amplifier) ของ Kistler รุ่น 5018 เพื่อขยายสัญญาณและแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นค่าความดันภายในกระบอกสูบและมีอุปกรณ์วัดตำแหน่งเพลลาข้อเหวี่ยง (Shaft encoder) ของ Baumer Electric รุ่น CH-8500 นำมาเฉลี่ยเป็นค่าความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน โดยผ่านโปรแกรมที่เขียนขึ้นในห้องปฏิบัติการ เทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก สำหรับการวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะทำการวัดในรูปแบบอัตราการไหลเชิงมวลด้วย Weight Scale ของ Omega รุ่น LCAE 2 kg สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดมลพิษของเครื่องยนต์ที่ทดสอบเป็นของ Horiba รุ่น MEXA 584L โดยวัดมลพิษได้แก่ HC, CO และNO เครื่องมือที่วัดปริมาณควันดำจะใช้ (Smoke meter) ของ Zexel ใน

ตารางที่ 1 ข้อมูลของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ

Engine	YANMAR L100V
Type	4-stroke, Air-Cooled, Diesel engine
Number of Cylinders	1
Bore x Stroke	86 mm x 76 mm
Combustion system	Direct injection
Displacement Volume	435 cc
Aspiration	Natural Aspiration
Compression ratio	21.2:1
Maximum rated output	6.8 kW@3600RPM
Fuel injection timing	15.5 CA BTDC

การวัดระดับความเข้มแสงที่ผ่านแผ่นกรองได้ตั้งแต่ 0 ถึง 100% ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ในการทดสอบทั้งหมดจะถูกติดตั้ง ดังรูปที่ 1 และตารางที่ 2



รูปที่ 1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์วัด

Measurement	Measuring	Accuracy	Uncertainty
In-cylinder Pressure	0-250 bar	±2%	±2%
CO	0.00-10 % vol	±0.5 vol	±0.5%
HC	0-10,000 ppm-vol	≤ 200ppm	±0.2%
NO	5-5000 ppm-vol	≤ 500ppm	±0.5%

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบจะเปรียบเทียบน้ำมันดีเซล B7 กับ น้ำมันผสมระหว่างน้ำมันดีเซลและน้ำมันไพโรไลซิส ในอัตราส่วน 50:50% P50 โดยปริมาตรของน้ำมันที่ใช้ทดสอบ ในส่วนคุณสมบัติของน้ำมันที่ใช้ทดสอบจะผ่านการตรวจสอบจากฝ่ายเทคนิคและความปลอดภัย อาชีวอนามัยสิ่งแวดล้อม บริษัท บางจากคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ดังตารางที่ 3 จากนั้นทำการศึกษาที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที (rpm) ที่ภาระงาน 25%, 50% และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์ ที่มีองศาการฉีดน้ำมันมาตรฐานที่ 15.5 องศา ก่อนศูนย์ตายบน และทำการปรับองศาการฉีดล่วงหน้าของน้ำมัน (Advance Injection Timing: ADV) ที่ 16.5 และ 17.5 (°BTDC) โดยทำการเปลี่ยนขนาดความหนาของแผ่นชิม (Shim) ซึ่งความหนาของแผ่นชิมที่เปลี่ยนไป 0.1 มิลลิเมตร จะทำให้องศาการฉีดน้ำมันเปลี่ยนไป 1 องศาเพลลาข้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นมาตรฐานของทางผู้ผลิต [6] โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และการปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงต่าง ๆ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของน้ำมันที่ทดสอบ

Property	Test Method	Diesel B7	P50	P100
LHV (MJ/kg)	ASTM D240	44.912	44.45	43.99
Density@ 15°C (g/cm ³)	ASTM D4052	0.8289	0.815	0.789
Flash Point (°C)	ASTM D93	63	30	17
Viscosity@ 40°C (mm ² /s)	ASTM D445	3.416	2.189	1.68
Cetane Index	ASTM D4737	60	57	48

ที่ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบในอัตราส่วนผสมน้ำมันในช่วง 10%-50% โดยเพิ่มอัตราส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสขึ้นทีละ 10% พบว่าเครื่องยนต์ที่ทำการทดสอบมาความล่าช้าในการจุดระเบิดเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ได้ศึกษา [12]

2.2.1 สมการที่ใช้คำนวณความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก [7]

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเป็นการวัดอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อกำลังที่ให้ออกมาเป็นค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Break Specific Fuel Consumption: BSFC) ดังสมการที่ 1

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (1)$$

โดย \dot{m}_f = อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (g / h)

P_b = กำลังงานเบรกของเครื่องยนต์ที่ได้จากการทดสอบ (kW)



2.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency: BTE, η_f) (%)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเป็นการวัดความสามารถในการเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการเผาไหม้ให้กลายเป็นพลังงานกล ดังสมการที่ 2

$$\eta_f = \frac{3600}{BSFC \cdot Q_{HV}} \times 100 \quad (2)$$

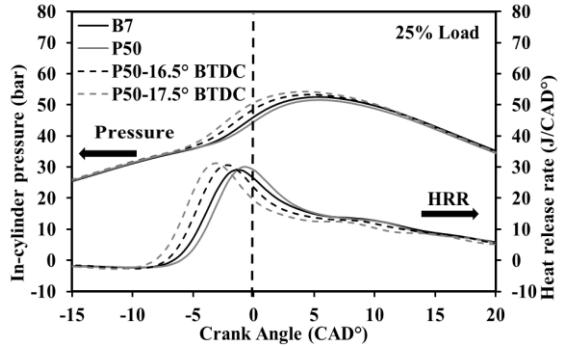
โดย Q_{HV} = ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (MJ / kg)

3. ผลการวิจัย

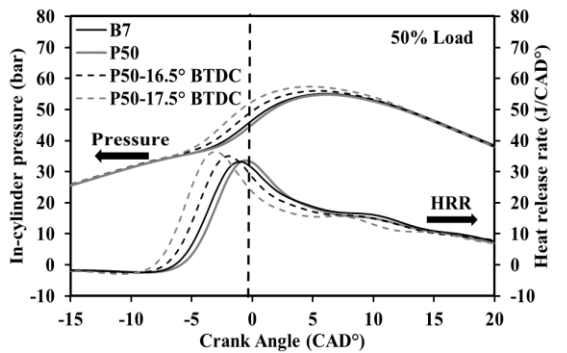
3.1 ความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน

จากการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบน้ำมันดีเซล B7 กับน้ำมันไพโรไลซิส P50 พบว่า น้ำมันไพโรไลซิส P50 ที่องศาการฉีดเดิมของเครื่องยนต์ มีความล่าช้าในการจุดระเบิดแต่กับปลดปล่อยความร้อนได้สูงกว่าน้ำมันดีเซล ทางผู้วิจัยจึงทำการปรับองศาการฉีดล่วงหน้าเป็น 16.5-17.5 (°BTDC) เพื่อสังเกตถึงพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นกับความดันภายในกระบอกสูบ พบว่า การปรับองศาการฉีดน้ำมันมีผลต่อการปลดปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงและความดันในกระบอกสูบ

จากรูปที่ 2 และ 3 จะพบว่ากรณีที่ปรับองศาการฉีดเชื้อเพลิงส่งผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันไพโรไลซิส P50 ทำให้ระยะเวลาในการดูดซับความร้อนของน้ำมันได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงขึ้นเมื่อองศาการฉีดน้ำมัน

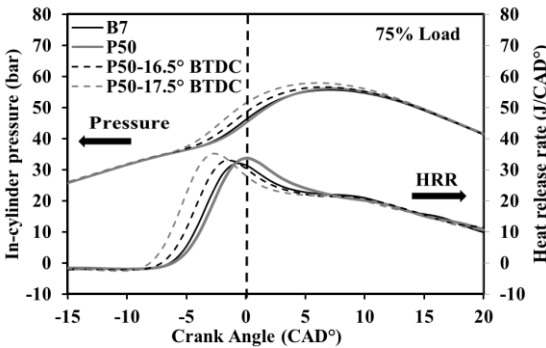


รูปที่ 2 ความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน ในรอบ 1500 rpm ที่ภาระงาน 25% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

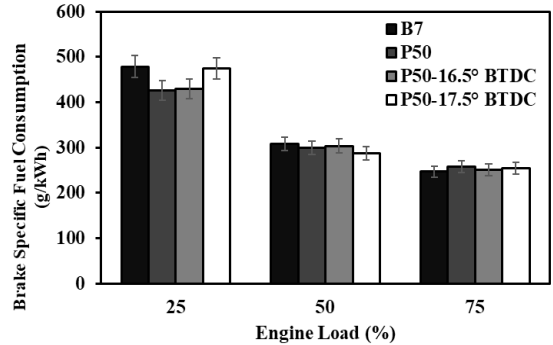


รูปที่ 3 ความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน ในรอบ 1500 rpm ที่ ภาระงาน 50% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

เปลี่ยนแปลงไปและจะสังเกตได้ชัดเจนเมื่อทำงานที่ภาระงาน 75%ที่องศาการฉีด 16.5-17.5 (°BTDC) การดูดซับความร้อนและการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงมีระยะเวลาที่เร็วขึ้นซึ่งส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันภายในกระบอกสูบที่สูงกว่าน้ำมันไพโรไลซิส P50 ที่ไม่ได้ทำการปรับองศาการฉีด



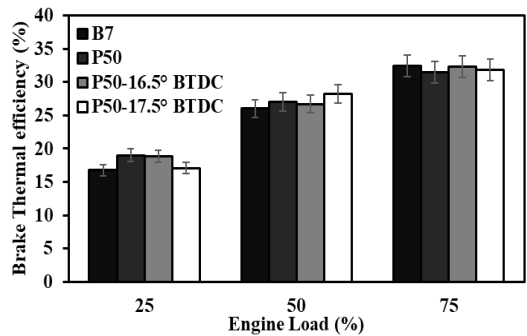
รูปที่ 4 ความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน ในรอบ 1500 rpm ที่ภาระงาน 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์



รูปที่ 5 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค ในรอบ 1500 rpm ที่ภาระงาน 25%, 50%, และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

3.2 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคจากการทดสอบจะพิจารณาได้ว่า ความสิ้นเปลืองจำเพาะเบรคของน้ำมันไพโรไลซิส P50 ในภาระงาน 25% และน้ำมันไพโรไลซิส P50 ที่ปรับองศาอยู่ที่ 16.5 (°BTDC) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล B7 และน้ำมันไพโรไลซิสที่ปรับองศาอยู่ที่ 17.5 (°BTDC) เนื่องจาก น้ำมันไพโรไลซิสที่ปรับองศาอยู่ที่ 17.5 (°BTDC) มีระยะเวลาในการฉีดที่เพิ่มขึ้นแต่อยู่ในช่วงภาระงานต่ำ จึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น แต่ในภาระงาน 50% พบว่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของน้ำมันดีเซล B7 จะมีค่าสูงสุดของการทดสอบ ในขณะที่ภาระงาน 75% น้ำมันไพโรไลซิส P50 จะมีค่าดังกล่าวสูงกว่าน้ำมันดีเซล B7 และ อัตราการสิ้นเปลืองเบรคจำเพาะมีแนวโน้มลดลงตามภาระงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีอัตราการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราที่สูงโดยเฉพะน้ำมันไพโรไลซิส P50 ที่มีสมบัติด้านความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลจึงส่งผลให้การฉีดน้ำมันเป็น



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคในรอบ 1500 rpm ที่ภาระงาน 25%, 50%, และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

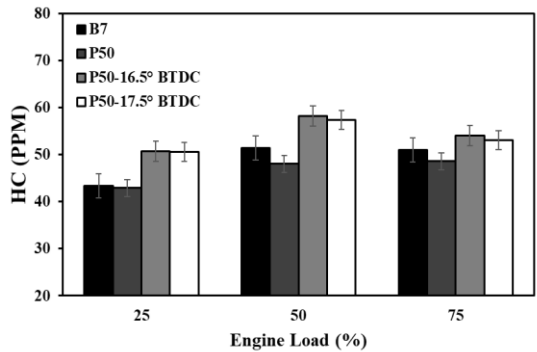
ฝอยละอองในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการผสมกันระหว่างน้ำมันกับอากาศในห้องเผาไหม้ดีขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีขึ้นตามไปด้วยตามที่ได้แสดงไว้ที่รูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ทั้งนี้อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรคของน้ำมันไพโรไลซิส P50 และน้ำมันไพโรไลซิส P50 ที่ปรับองศาการฉีดจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล B7 ในช่วงภาระงานที่ 50% และ 75% ของเครื่องยนต์



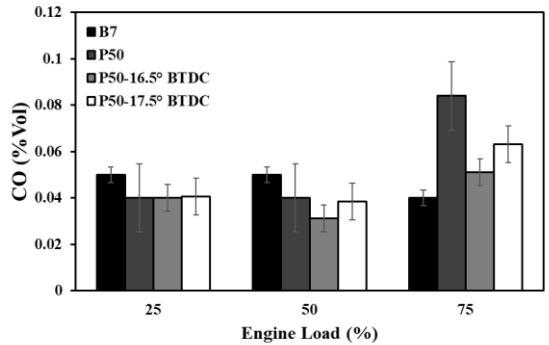
3.3 การปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์

รูปที่ 7 แสดงค่าปริมาณ การปลดปล่อย ไฮโดรคาร์บอน (HC) จากไอเสีย พบว่าปริมาณมลพิษของน้ำมันไพโรไลซิส P50 ที่องศาเดิมมีค่ามลพิษที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล B7 เมื่อเพิ่มภาระงานขึ้นปริมาณ HC มีค่าที่สูงขึ้น แต่ในภาระงานสูงสุดกับพบว่า ปริมาณ HC กับลดลง เนื่องจากการที่เครื่องยนต์ทำงานในภาระงานที่สูงขึ้นนั้น จะต้องทำการฉีดน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ จึงทำให้ในภาระงานสูงสุดมีปริมาณ HC ที่ลดลง ในส่วนการปรับตั้งองศาการฉีดที่ 16.5 และ 17.5 พบว่าปริมาณ HC ของน้ำมันไพโรไลซิส P50 เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการฉีดมากขึ้นและเนื่องด้วยน้ำมันไพโรไลซิส P50 มีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันดีเซล B7 ส่งผลให้การฉีดเชื้อเพลิงเป็นฝอยละอองลดลง จึงทำให้เชื้อเพลิงถูกฉีดถึงผนังกระบอกสูบจึงมีส่วนของเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้จึงทำให้ปริมาณ HC เพิ่มขึ้น [11]

รูปที่ 8 แสดงค่าการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากไอเสีย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของภาระงานของเครื่องยนต์ ส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อย CO โดยในภาระงานต่ำและกลาง น้ำมันไพโรไลซิสมีแนวโน้มการปลดปล่อย CO ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลทั้งในองศามาตรฐานและหลังการปรับตั้งองศาการฉีดล่วงหน้าของน้ำมัน ผลทำให้ปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเผาไหม้ที่ดีขึ้น สังเกตได้จากประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เพิ่มขึ้น และเนื่องด้วยเครื่องยนต์ดีเซลมีอัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงที่บาง (Lean Combustion) [8] ทั้งนี้ในภาระงาน 75% อัตราการปลดปล่อย CO ของน้ำมันไพโรไลซิสสูงกว่าน้ำมันดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการฉีดน้ำมันเพิ่มในภาระงานที่สูงขึ้นและอาจ



รูปที่ 7 ค่าไฮโดรคาร์บอน (HC) ในรอบ 1500 rpm ที่ ภาระงาน 25%, 50%, และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

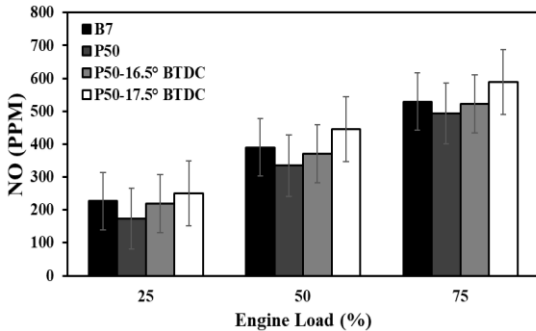


รูปที่ 8 ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในรอบ 1500 rpm ที่ ภาระงาน 25%, 50%, และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

เป็นผลจากการสเปรย์ของเชื้อเพลิง P50 ที่ติดค้างอยู่ผนังกระบอกสูบจึงทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด [9] เมื่อทำการปรับองศาการฉีดน้ำมันที่ 16.5 และ 17.5 (° BTDC) อัตราการปลดปล่อย CO ลดลง โดยองศาการฉีดน้ำมันที่ 16.5 สามารถลดการปลดปล่อย CO เทียบเท่าอัตราการปลดปล่อย CO ของน้ำมันดีเซลในภาระงาน 25% และ 50%



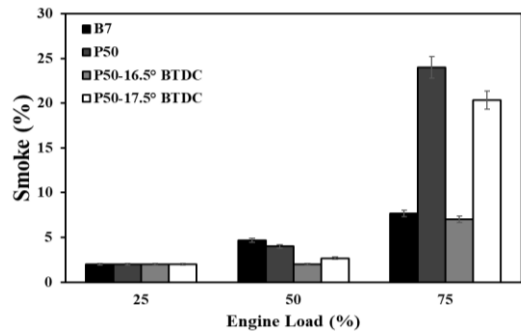
บทความวิจัย



รูปที่ 9 ค่าไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ในรอบ 1500 rpm ที่ภาระงาน 25%, 50%, และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

รูปที่ 9 แสดงปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO) จากการเผาไหม้เครื่องยนต์ที่เติมด้วยน้ำมันไฟโรไลซิสผสมดีเซล P50 [9] จากการทดสอบพบว่า ที่องค์การฉีดน้ำมันมาตรฐาน น้ำมันไฟโรไลซิสมีปริมาณการปลดปล่อย NO ที่ต่ำน้ำมันดีเซล ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติการเผาไหม้ที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซล ในทุกภาระงานของเครื่องยนต์ที่ทดสอบ แต่เมื่อทำการปรับตั้งองศาอยู่ที่ 16.5 และ 17.5 (°BTDC) จะมีแนวโน้มการปลดปล่อยปริมาณ (NO) ที่เพิ่มขึ้น ในทุกภาระงานของเครื่องยนต์เป็นผลจากประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เพิ่มขึ้นดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4 และ เนื่องจากองค์การฉีดน้ำมันมีความล้นหน้าก่อนขององค์การฉีดเติมเป็นผลทำให้ช่วงเวลาการผสมตัวกันของเชื้อเพลิงกับอากาศมีความยาวนานขึ้น ส่งผลทำให้การเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

รูปที่ 10 แสดงปริมาณควันดำ (Smoke) สังเกตได้ว่าปริมาณควันดำมีผลต่อภาระงาน โดยในภาระงาน 50% ปริมาณควันดำของน้ำมันไฟโรไลซิส P50 ในองค์การฉีดมาตรฐานมีปริมาณควันดำที่ต่ำกว่าน้ำมัน



รูปที่ 10 ค่าควันดำ ในรอบ 1500 rpm ที่ภาระงาน 25%, 50%, และ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์

ดีเซล และเมื่อปรับตั้งที่ 16.5 และ 17.5 (°BTDC) ส่งผลให้ปริมาณควันดำลดลง ซึ่งผลสอดคล้องกันในภาระงาน 75% ทั้งนี้ผลการทดสอบที่การปรับตั้ง 16.5 (°BTDC) ส่งผลให้สามารถลดการปลดปล่อยควันดำสอดคล้องกับอัตราการลดลงของการปลดปล่อย CO [10]

4. บทสรุป

จากการวิจัยพบว่า น้ำมันไฟโรไลซิสที่องค์การฉีดมาตรฐานในด้านสมรรถนะจะมีค่าที่ใกล้เคียงน้ำมันดีเซล แต่จะมีความล่าช้าในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงมากกว่าน้ำมันดีเซล และในด้านการปลดปล่อยมลพิษโดยรวมมีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่เนื่องจากการปลดปล่อยปริมาณ CO เพิ่มขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฟโรไลซิสไม่ค่อยดีและมีการปลดปล่อยปริมาณควันดำมีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล B7 ถึง 16.4%

น้ำมันไฟโรไลซิส ที่ปรับตั้งองศาการฉีดอยู่ที่ 16.5 และ 17.5 (°BTDC) ในด้านสมรรถนะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันไฟโรไลซิส P50 ที่องค์การฉีด



น้ำมันมาตรฐาน ส่วนด้านการปลดปล่อยมลพิษจะมีค่า HC ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงล่วงหน้า อาจทำให้มีน้ำมันเชื้อเพลิงไปสะสมที่ผนังกระบอกสูบมากขึ้นจึงส่งผลทำให้มีปริมาณของ HC ที่เผาไหม้ไม่หมดจากจังหวัดการทำงานของเครื่องยนต์ถูกปลดปล่อยจากไอเสียเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการปรับองศาการฉีดที่ 16.5 ($^{\circ}$ BTDC) ปริมาณควันดำและคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าต่ำสุดเนื่องด้วยเป็นองศาการฉีดที่เหมาะสมกับน้ำมันไพโรไลซิส และส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้น

ดังนั้นจากการวิจัยสรุปได้ว่าสามารถใช้ น้ำมันไพโรไลซิส P50 ทดแทนน้ำมันดีเซล โดยเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและลดการนำเข้า น้ำมันดีเซล และสามารถลดปริมาณมลพิษ (CO , NO) และควันดำ ด้วยการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันที่ 16.5 ($^{\circ}$ BTDC)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทดแทน (CTAE) ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับการสนับสนุนทางวิชาการและ ขอขอบคุณ บริษัท ชินฮวด เองเนวัตกรรม จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ที่ให้ น้ำมันไพโรไลซิสสำหรับการทดสอบในงานวิจัยและขอขอบคุณ ฝ่ายเทคนิคและความปลอดภัย-อาชีวอนามัยสิ่งแวดล้อม บริษัท บางจากคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) สำหรับความอนุเคราะห์ตรวจสอบคุณสมบัติ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] http://www.pcd.go.th/Info_serv/File/Plastic%20Roadmap.pdf (Accessed on 29 June 2019)
- [2] https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241_p61-64.pdf (Accessed on 29 June 2019)
- [3] R. Miandad, M.A. Barakat, M. Rehan, A.S. Aburizaiza, I.M.I. Ismail and A.S. Nizami, Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts. *Waste Management*, 2017, 69, 66-78.
- [4] S.D.A. Sharuddin, F. Abnisa, W.M.A.W. Daud and M.K. Aroua, A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy Conversion and Management*, 2016, 115, 308-326.
- [5] R.P. Harshal and M.L. Shailendra, Waste plastic pyrolysis oil alternative fuel for CI engine – A review, *Research Journal of Engineering Sciences*, 2013, 2(2), 26-30.
- [6] <https://www.nuvair.com/manuals/Yanmar-LV-100-Use-Manual.pdf> (Accessed on 29 June 2020)
- [7] O. Nilphai, The effect of acetone-butanol-ethanol blended diesel fuel on the engine stability of a single cylinder diesel engine, *The Journal of Industrial Technology*, 2020, 16(2), 89-103.



- [8] J.B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, Inc., NY, USA, 1988.
- [9] I. Kalargaris, G. Tian and S. Gu, Experimental characterisation of a diesel engine running on polypropylene oils produced at different pyrolysis temperatures. Fuel, 2018, 211, 797-803.
- [10] V.K. Kaimal and P. Vijayabalan, A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines, Waste Management, 2016, 51, 91-96.
- [11] S. Sittichompoo, K. Theinnoi, B. Sawatmongkhon, T. Wongchang, T. Iamcheerangkoon and S. Phugot, Promotion effect of hydrogen addition in selective catalytic reduction of nitrogen oxide emissions from diesel engines fuelled with diesel-biodiesel-ethanol blends. Alexandria Engineering Journal, 2021, 61(7), 5383-5395
- [12] W. Arjharn, P. Liplap, S. Maithomklang, K. Thammakul S. Chuepeng and E. Sukjit Distilled waste plastic oil as fuel for a diesel engine: Fuel production, combustion characteristics, and exhaust gas emissions, ACS Omega, 2022, 7, 9720-9729

การลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาและแก้ไขมุมเอียงของหัวอ่าน สำหรับการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย

สันติ กุลการชาย และ ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

ศูนย์วิจัยการประมวลผลสัญญาณขั้นสูงสำหรับนวัตกรรมเพื่ออนาคต, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: santi@npru.ac.th

วันที่รับบทความ: 18 เมษายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 9 สิงหาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 8 กันยายน 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกำลังเข้าใกล้ขีดจำกัดทางด้านซูเปอร์พาราแมกเนตริกทำให้ไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (AD: Areal Density) ได้เกิน 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tb/in^2 : Tera-bit per Square Inch) เทคโนโลยีการบันทึกแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย (BPMR: Bit-patterned Magnetic Recording) เป็นตัวเลือกหนึ่งที่จะมาแทนเทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งเทคโนโลยี BPMR สามารถเพิ่มค่า AD ได้สูงถึง $4 Tb/in^2$ ในทางปฏิบัติมุมเอียงของหัวอ่าน (SA: Skew Angle) เป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดที่วงจรตรวจหา (Detector) ซึ่งหากไม่มีการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบจาก SA จะทำให้สมรรถนะโดยรวมของระบบ BPMR ต่ำลงเป็นอย่างมาก บทความนี้นำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาและแก้ไข SA ซึ่งทำโดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ต (Target) และผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ BPMR โดยใช้แผนภาพโพรไฟล์ SA (SA Profile) โดยเมื่อมีการตรวจพบ SA ระบบจะทำการเปลี่ยนคูทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละ SA เพื่อใช้ในกระบวนการตรวจหาข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถลดความซับซ้อนของแผนภาพเทรลลิสที่ใช้ในวงจรตรวจหาวีเทอร์บีจาก 36 สถานะ และมี 6 เส้นสาขาที่ออกจากแต่ละสถานะ เหลือเพียง 32 สถานะและมี 4 เส้นสาขาที่ออกจากแต่ละสถานะ โดยจากการทดลองพบว่าสมรรถนะของระบบที่นำเสนอให้สมรรถนะใกล้เคียงกับระบบที่ไม่ได้ลดความซับซ้อน เมื่อ AD น้อยกว่า $2.5 Tb/in^2$

คำสำคัญ: การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก; บิตแพทเทิร์นมีเดีย; มุมเอียงของหัวอ่าน; วงจรตรวจหาวีเทอร์บี

Reducing the Complexity of the Skew Angle Detector and Corrector for Bit-Patterned Magnetic Recording

Santi Koonkarnkhai and Piya Kovintavewat*

Advanced Signal Processing for Disruptive Innovation Research Center, Nakhon Pathom Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: santi@npru.ac.th

Received: 18 April 2022; Revised: 9 August 2022; Accepted: 8 September 2022

Online Published: 19 December 2022

Abstract: A current magnetic recording technology is approaching the superparamagnetic limitation, which makes it impossible to increase an areal density (AD) beyond 1 tera-bit per square inch (Tb/in²). A bit-patterned magnetic recording (BPMR) technology is an alternative solution to replace the current technology, which can achieve AD up to 4 Tb/in². Practically, a skew angle (SA) is one of the major problems that cause faults in the detector. Without SA detection and correction, the overall BPMR system has greatly deteriorated. This paper presents a method to reduce the complexity of the SA detector and corrector, which can be achieved by comparing the target coefficients and the BPMR channel impulse response using a SA profile. When the SA is detected, a suitable pair of targets and equalizer for the detected SA will be employed in the data detection process. In addition, the complexity reduction makes the trellis diagram used in the Viterbi detector have a fewer number of states and branches, specifically from 36 states with 6 outgoing branches to 32 states with 4 outgoing branches. Simulation results show that the proposed system can provide similar performance to the conventional system at the AD of less than 2.5 Tb/in².

Keywords: Magnetic recording; Bit-patterned media; Skew angle; Viterbi detector

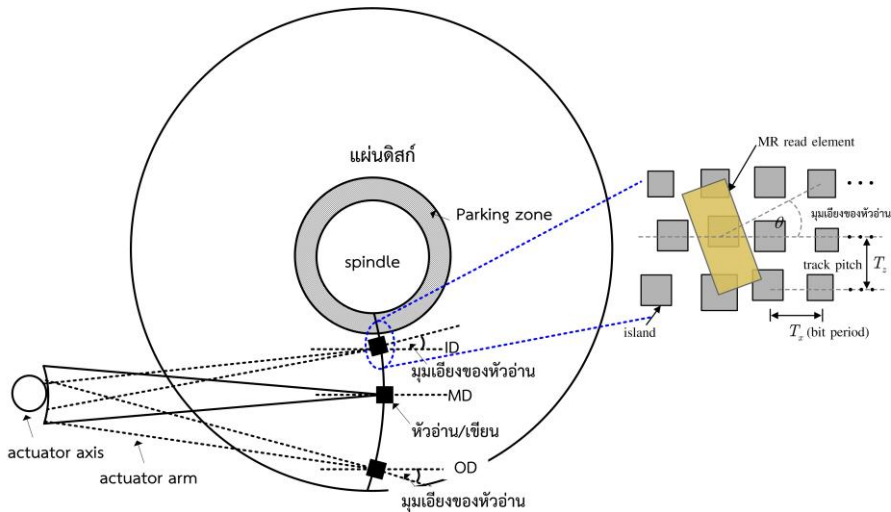


1. บทนำ

ความต้องการในการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะปัจจุบันที่มีการแพร่ระบาดของโรคติดต่อ COVID-19 ทำให้ผู้คนหันมาใช้เทคโนโลยีต่างๆ ในการทำงาน การเรียน และอื่นๆ เพื่อปรับตัวในการใช้ชีวิตให้ปลอดภัยจากโรคติดต่อ COVID-19 หรือที่รู้จักว่า “ชีวิตวิถีใหม่ (New Normal)” ไม่ว่าจะเป็นการประชุมออนไลน์ การเรียนออนไลน์ การชมภาพยนตร์ออนไลน์ สื่อสังคมออนไลน์ (Social Media) และกล้องวงจรปิด เป็นต้น สิ่งต่างๆ เหล่านี้ก่อให้เกิดข้อมูลข่าวสารดิจิทัลจำนวนมาก โดยมีการประมาณการณ์ว่าในแต่ละวันจะมีการสร้างข้อมูลดิจิทัลประมาณ 2.5 เอกซะไบต์ (EB: Exa-byte) ต่อวัน หรือประมาณ 912.5 EB ต่อปี [1, 2] ดังนั้นเพื่อรองรับข้อมูลจำนวนมากดังกล่าวอุปกรณ์สำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลดิจิทัลนั้นมีหลายประเภท เช่น โซลิดสเตจไดรฟ์ (SSD: Solid State Drive), แฟลชไดรฟ์ (Flash Drive), ออปติคัลไดรฟ์ (optical drive), เทปแม่เหล็ก (Magnetic Tape), และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD: Hard Disk Drive) เป็นต้น สำหรับ SSD และแฟลชไดรฟ์จะใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในการจัดเก็บข้อมูลและมีความเร็วในการอ่านและเขียนที่สูงมาก ในขณะที่ HDD จะใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กในการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล และถือว่าเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลที่นิยมใช้ในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์จัดเก็บ

ฐานข้อมูลขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจาก HDD มีความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลจำนวนมากและมีราคาถูก เมื่อเทียบกับสื่อบันทึกแบบอื่นที่มีความจุ (Capacity) ข้อมูลเท่ากัน นอกจากนี้ HDD รุ่นใหม่ๆ ได้มีการนำ SSD หรือใช้ DRAM (Dynamic RAM) เข้ามาเป็นที่พักข้อมูล (Buffer) หรือหน่วยความจำแคช (Cache memory) โดยจะเรียก HDD ประเภทนี้ว่า HDD ลูกผสม (Hybrid) ซึ่งส่งผลให้อัตราถ่ายโอน (Transfer Rate) ข้อมูลของ HDD เพิ่มขึ้น และในกรณีที่ HDD เกิดความเสียหายยังสามารถที่จะกู้ข้อมูลบางส่วนที่ไม่เสียหายมาใช้งานต่อได้ ซึ่ง SSD ไม่สามารถทำได้

ปัจจุบัน HDD ได้ใช้เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR: Perpendicular Magnetic Recording) ซึ่งสามารถจัดเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ (AD: Areal Density) ได้สูงสุดประมาณ 1 เทระบิตต่อตาราง นิ้ว (Tb/in²: Terabit per Square Inch) เนื่องจากขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนตริก (Super-Paramagnetic Limit) ทำให้เทคโนโลยี PMR ไม่สามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ได้ ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมและนักวิจัยได้ให้ความสนใจเทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์นนีเดีย (BPMR: Bit-patterned Magnetic Recording) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่จะทำการบันทึกข้อมูลลงบนเกาะข้อมูล (Island) หรือเรียกว่า “ไอแลนด์” ซึ่งทำจากวัสดุที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก โดยแต่ละไอแลนด์จะถูกแบ่งหรือทำให้แยกออกจากกันด้วยวัสดุที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก ตามที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผ่นดิสก์ หัวอ่าน/เขียน การจัดเรียงของไอแลนด์ และมุมเอียงของหัวอ่าน

โดยทั่วไปค่า AD ของระบบ BPMR จะถูกกำหนดด้วยระยะบิต (Bit Period, T_x) และระยะแทร็ก (Track Pitch, T_z) สำหรับเทคโนโลยี BPMR สามารถเพิ่มค่า AD ได้สูงถึง 4 Tb/in² และเมื่อทำงานร่วมกับเทคโนโลยีการใช้พลังงานเข้าช่วย (EAMR: Energy Assisted Magnetic Recording) จะเรียกเทคโนโลยีใหม่นี้ว่า “HDMR (Heated Dot Magnetic Recording)” [3] ซึ่งจะสามารถเพิ่มค่า AD ได้สูงถึง 10 Tb/in² อย่างไรก็ตามระบบ BPMR จะเผชิญกับผลกระทบหลายอย่างที่จะทำให้สมรรถนะของระบบลดลง ตัวอย่างเช่น การแทรกสอดสองมิติ (2-Dimensional Interference) ประกอบด้วยการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI: Intersymbol Interference) ที่เกิดจากไอแลนด์ข้างเคียงในทิศทางตามแทร็ก (Along Track) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI: Intertrack Interference) ที่เกิดจากไอแลนด์ที่อยู่ติดกันในทิศทางข้ามแทร็ก นอกจากนี้ระบบ BPMR ยังมีผลกระทบจากหัวอ่านเอียง (SA: Skew Angle) [14, 15] ซึ่งเกิดจากหัวอ่าน

(Across Track) ในทางปฏิบัติผลกระทบจากการแทรกสอดสองมิติจะทำให้สมรรถนะโดยรวมของระบบด้อยลงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่า AD สูง [4] ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอวิธีการลดผลกระทบจากการแทรกสอดสองมิติ [5-9] ผลกระทบจากแทร็กมิสเรจิสเทรชัน (TMR: Track Mis-registration) เกิดจากหัวอ่านเคลื่อนที่ออกจากแทร็กที่ต้องการอ่านในทิศทางข้ามแทร็ก [10], สัญญาณรบกวนสลับบันทึก (Media Noise) ที่มีสาเหตุจากขนาดและรูปร่างของแต่ละไอแลนด์ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) หรือเกิดจากตำแหน่งของแต่ละไอแลนด์ไม่สม่ำเสมอ [11] ซึ่งจะเรียกผลกระทบนี้ว่า “Position Jitter Noise”, ข้อผิดพลาดจากการเข้าจังหวะเขียน (Write Synchronization Error) ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดจากการแทรก/การลบ และการแทรก (Insertion/Deletion and Substitution Error) [12, 13] ที่มุมเอียงกับทิศทางตามแทร็กตามที่แสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปผลกระทบจาก SA จะก่อให้เกิด



ข้อผิดพลาดจำนวนมากที่เอาต์พุตของวงจรตรวจหา ซึ่งส่งผลทำให้สมรรถนะโดยรวมของระบบด้อยลง

ในทางปฏิบัติผลกระทบจาก SA จะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านมีการเคลื่อนที่ออกจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ID: Inner Diameter) ไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (OD: Outer Diameter) ซึ่งมุมเอียงของหัวอ่านระหว่าง ID และ OD จะมีขนาดสูงสุดประมาณ $25^\circ - 35^\circ$ (องศา) [14] ซึ่งจะก่อให้เกิดข้อผิดพลาดจำนวนมากที่วงจรตรวจหา โดย He *et al.* [15] ได้ทำการออกแบบระบบกลไกเพื่อลดมุมเอียงของหัวอ่านให้เข้าใกล้ 0° และยังสามารถเพิ่ม AD ได้ 12 – 18% แต่อุปกรณ์กลไกดังกล่าวส่งผลให้การเคลื่อนที่ของหัวอ่านช้าลง 50% (ส่งผลให้อัตราการอ่านลดลงตามไปด้วย) นอกจากนี้ Kankhunthod *et al.* [16] ได้นำเสนอเทคนิคการประมาณค่า SA โดยการใช้เพอร์เซปตรอนหลายชั้น (Multilayer Perceptron) จากสัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal) ซึ่งสามารถประมาณค่า SA ได้แม่นยำ ณ SNR และ SA ที่มีค่าสูง และสุดท้าย Koonkarnkhai *et al.* [17] ได้นำเสนอการตรวจหา SA โดยใช้การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ต (target) ที่ได้จากการกับค่าสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ BPMP และทำการแก้ไขโดยการเปลี่ยนคู้ทาร์เก็ต (Target) และอีควอลไลเซอร์ (Equalizer) ที่ได้ออกแบบไว้สำหรับความรุนแรงของ SA ต่างๆ ซึ่งจะถูกจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำ (Memory)

สำหรับบทความนี้จะนำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนของการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบจาก SA ที่ได้นำเสนอไว้ใน [17] ซึ่งจะเป็นการลดผลความซับซ้อน

ของวงจรตรวจหา SA และลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาวีเทอร์บีแบบสองมิติ (2D Viterbi Detector)

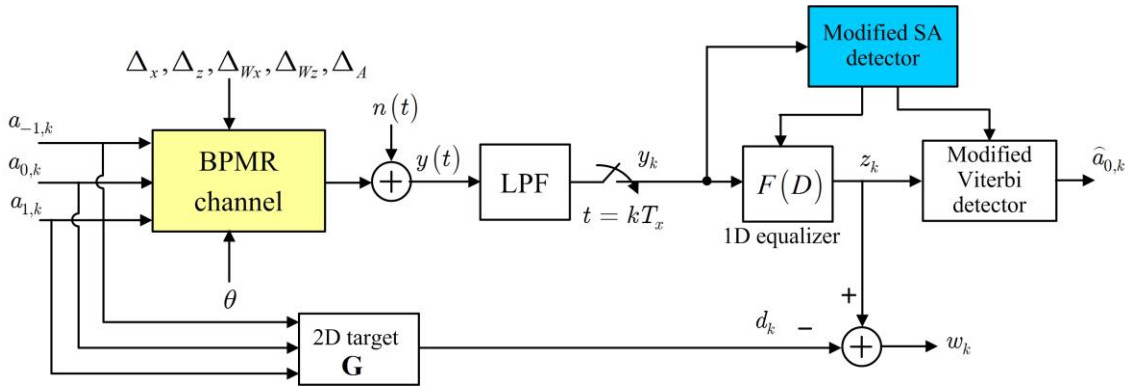
2. แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMP

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณระบบ BPMP ที่มีผลกระทบจากมุมเอียงของหัวอ่าน เมื่อกำหนดให้ $a_{j,k} \in \{\pm 1\}$ คือลำดับข้อมูลอินพุตแบบไบนารี (binary) ที่ถูกบันทึกลงในระบบ BPMP โดยที่ $j \in \{-1, 0, 1\}$ เมื่อ $j = -1$ คือแตรีกบน $j = 0$ คือแตรีกกลาง และ $j = 1$ คือแตรีกล่าง สำหรับ k คือลำดับของบิตข้อมูล เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลกระทบจาก SA จะสมมุติให้ระบบ BPMP ไม่มีผลกระทบจากการเข้าจังหวะเขียน ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ $y(t)$ ในรูปที่ 2 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 1 [4, 18]

$$y(t) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{m,k} H(-mT_z, t - kT_x) + n(t) \quad (1)$$

เมื่อ $H(z, x)$ คือผลตอบสนองอิมพัลส์แบบสองมิติ (2D impulse response) ของช่องสัญญาณ BPMP และ $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN: additive white Gaussian noise) ที่ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองด้าน (double-sided power spectral density) เท่ากับ $N_0/2$

สำหรับผลตอบสนองอิมพัลส์สองมิติ ของช่องสัญญาณ BPMP ที่ใช้โอแลนดิส์เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 11 nm (นาโนเมตร) และหนา 10 nm หัวอ่านแบบ MR (Magneto-resistive) มีความหนา 4 nm และกว้าง 15 nm ระยะบิน (Fly Height) 10 nm ระยะช่องว่าง (Gap Distance) 16 nm สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2 [17]



รูปที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR

$$H(z, x) = (A + \Delta_A) \exp \left\{ -\frac{1}{2c^2} \left[\left(\frac{x_r + \Delta_x}{W_x + \Delta_{W_x}} \right)^2 + \left(\frac{z_r + \Delta_z}{W_z + \Delta_{W_z}} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

เมื่อ $A = 1$ คือค่านอร์มอลไลซ์ (Normalized) แอมพลิจูด $x_r = x \cos(\theta) - z \sin(\theta)$, $z_r = x \sin(\theta) + z \cos(\theta)$, θ คือมุมเอียงหัวอ่านหน่วยเป็นองศา ($^\circ$), $c \approx 0.42466$ คือค่าคงตัว, $W_x = 19.44$ nm คือค่า PW_{50} ในทิศทางตามแตรีก, $W_z = 24.8$ nm คือค่า PW_{50} ในทิศทางข้ามแตรีก เมื่อ PW_{50} คือความกว้างของสัญญาณพัลส์ ณ 50% ของแอมพลิจูดสูงสุด สำหรับ Δ_x, Δ_z คือความแปรปรวน (Fluctuation) ของตำแหน่งไอแลนต์ในทิศทางตามแตรีกและข้ามแตรีกตามลำดับ Δ_A คือความแปรปรวนของแอมพลิจูดของผลตอบสนองอิมพัลส์สองมิติที่เกิดจากขนาดของไอแลนต์ และ Δ_{W_x} และ Δ_{W_z} คือความแปรปรวนของ PW_{50} ในทิศทางตามแตรีกและทิศทางข้ามแตรีกตามลำดับ โดยที่ $\Delta_x, \Delta_z, \Delta_A, \Delta_{W_x}$ และ Δ_{W_z} ถูกจำลองด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density Function) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ_j^2 เมื่อ σ_j เป็นเปอร์เซ็นต์ของ T_x

สำหรับวงจรรอบรับแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สัญญาณอ่านกลับที่ได้รับจากหัวอ่านจะถูกส่งเข้าไปยังวงจรรองต่ำผ่าน (LPF: Low-pass Filter) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนนอกแถบความถี่ที่ใช้งาน หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรถักตัวอย่าง (Sampler) ที่มีอัตราการชักตัวอย่างเท่ากับ $t = kT_x$ ทำให้ได้ลำดับข้อมูล $\{y_k\}$ โดยในการทดลองนี้จะสมมุติให้วงจรรองต่ำผ่านและวงจรถักตัวอย่างทำงานแบบอุดมคติ หลังจากนั้นลำดับข้อมูลที่ได้จากการชักตัวอย่าง $\{y_k\}$ จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรรีโควไลเซอร์ที่ออกแบบโดยใช้หลักการข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (MMSE: Minimum Mean-Squared Error) [19] เพื่อทำการปรับสัญญาณให้เป็นไปตามทาร์เก็ตที่ต้องการทำให้ได้ลำดับข้อมูล $\{z_k\}$ ซึ่งจะส่งต่อไปยังวงจรถรหาวิเทอร์บีเพื่อหาลำดับอินพุต $\{a_{0,k}\}$ ที่ควรจะเป็นมากที่สุด (Maximum Likelihood)



สำหรับวงจรภาครับที่นำเสนอใน [17] เพื่อลดผลกระทบจาก SA ลำดับข้อมูลที่ได้จากการซักรตัวอย่าง $\{y_k\}$ จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรตรวจหา SA (SA detector) เพื่อทำหน้าที่ในการประมาณค่าความรุนแรงของ SA หลังจากนั้นระบบจะทำการเลือกคู่ของทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมกับมุมเอียงของหัวอ่านมาใช้งานโดยใช้ตารางค้นหา (Lookup Table) ซึ่งคู่ของทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ได้ถูกออกแบบและจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟไว้ล่วงหน้า อย่างไรก็ตามสำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงวงจรตรวจหา SA ให้มีความซับซ้อนลดลง และได้ปรับปรุงวงจรตรวจหาอีเทอร์บีให้มีความซับซ้อนลดลงด้วย

3. การตรวจหาและการแก้ไขมุมเอียงของหัวอ่านแบบทั่วไป

โดยทั่วไปเมทริกซ์ผลตอบสนองช่องสัญญาณสองมิติ สามารถหาได้จากการซักรตัวอย่างผลตอบสนองช่องสัญญาณสองมิติในสมการ (2) ณ เวลา T_x และ T_z ซึ่งจะได้ว่า $h(nT_z, nT_x)$ เมื่อ $n \in \{\pm 1, 0\}$ ดังนั้นเมทริกซ์ของผลตอบสนองช่องสัญญาณ BPMR ขนาด 3×3 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3

สำหรับผลกระทบจาก SA ในกรณีที่หัวอ่านเคลื่อนที่เข้าโซน ID (ตามที่แสดงในรูปที่ 1) มุมของ SA จะมีค่าเป็นบวกและจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ $\{h_{-1,-1}, h_{1,1}\}$ เพิ่มขึ้น และ $\{h_{-1,1}, h_{1,-1}\}$ ลดลง และในทางตรงกันข้ามเมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่เข้าโซน OD มุมของ SA จะมีค่าเป็นลบและจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ $\{h_{-1,1}, h_{1,-1}\}$ มีค่าเพิ่มขึ้น และ $\{h_{-1,-1}, h_{1,1}\}$ มีค่าลดลง เนื่องจากผลตอบสนอง

อิมพัลส์ของช่องสัญญาณเป็นเมทริกซ์แบบสองมิติ ดังนั้นในทางปฏิบัติวงจรตรวจหาอีเทอร์บีที่ใช้ในระบบ BPMR ต้องเป็นแบบสองมิติด้วยเช่นเดียวกัน เพื่อให้สามารถจัดการกับผลกระทบจาก ITI และสัญญาณรบกวนสี่บันทีกได้ โดยความซับซ้อนของวงจรตรวจหาอีเทอร์บีจะขึ้นอยู่กับทาร์เก็ตที่ใช้ เมื่อทาร์เก็ตแบบสองมิติ (G) สามารถเขียนเป็นเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 4

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{-1}(D) \\ h_0(D) \\ h_1(D) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{-1,-1} & h_{-1,0} & h_{-1,1} \\ h_{0,-1} & h_{0,0} & h_{0,1} \\ h_{1,-1} & h_{1,0} & h_{1,1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{-1}(D) \\ g_0(D) \\ g_1(D) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{-1,-1} & g_{-1,0} & g_{-1,1} \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ $h_{0,0} = 1$ คือค่านอร์มอไลซ์แอมพลิจูด ในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจาก TMR สัญญาณรบกวนสี่บันทีกและผลกระทบจาก SA เมทริกซ์ผลตอบสนองของช่องสัญญาณ BPMR ในสมการ (3) จะสมมาตร (Symmetric) กัน กล่าวคือ $h_{-1}(D) = h_1(D)$ เมื่อ D คือตัวดำเนินการหน่วงเวลา (Delay Operator) ในทางตรงกันข้ามเมทริกซ์ผลตอบสนองของช่องสัญญาณ BPMR จะอสมมาตร (Asymmetric) โดยที่ Koonkarnkhai *et al.* [17] ได้พบว่าเมทริกซ์ของช่องสัญญาณจะสมมาตรในแนวเส้นทแยงมุม $h_{-1}(D) = h_1(-D)$ เมื่อระบบมีผลกระทบจาก SA

จากสมการ (4) ทาร์เก็ตสองมิติที่สมมาตรในแนวเส้นทแยงมุมจะนิยามโดย $g_{0,0} = 1, g_{-1,1} = g_{1,-1}, g_{1,1} = g_{-1,-1}$ และ $g_{1,0} = g_{-1,0}$



เนื่องจากเมทริกซ์ของช่องสัญญาณจะสมมาตรในแนวเส้นทแยงมุมเมื่อระบบมีผลกระทบจาก SA ดังนั้นการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์สำหรับการลดผลกระทบจาก SA สามารถทำได้ดังนี้ จากรูปที่ 2 เมื่อกำหนดให้ w_k คือลำดับข้อผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตของอีควอไลเซอร์ $\{z_k\}$ และเอาต์พุตของทาร์เก็ต $\{d_k\}$ ที่ต้องการ ซึ่งข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE: Mean Squared Error) ของ $\{w_k\}$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (5) เพื่อป้องกันไม่ให้ผลลัพธ์ $\mathbf{f} = \mathbf{g} = \mathbf{0}$ ในกระบวนการที่ทำให้สมการ (5) มีค่าน้อยสุด ในที่นี้จะใช้เงื่อนไขบังคับโมนิก (Monic Constraint) ทำให้ได้ดังสมการที่ (6)

$$E[w_k^2] = E[(z_k - d_k)^2] \quad (5)$$

$$= E[(\mathbf{f}^T \mathbf{y}_k - \mathbf{g}^T \mathbf{a}_k)(\mathbf{f}^T \mathbf{y}_k - \mathbf{g}^T \mathbf{a}_k)^T]$$

เมื่อ $E[x]$ คือตัวดำเนินการค่าคาดหวัง (expectation operator) ของตัวแปรสุ่ม x , $z_k = f_k^* y_k = \mathbf{f}^T \mathbf{y}_k$, $d_k = g_{j,k} \otimes a_{j,k} = \mathbf{g}^T \mathbf{a}_k$ เมื่อ $*$ และ \otimes คือตัวดำเนินการคอนโวลูชัน (Convolution Operator) แบบหนึ่งมิติและแบบสองมิติ ตามลำดับ และ $[\cdot]^T$ คือตัวดำเนินการสลับเปลี่ยน (Transpose Operator) สำหรับ $\mathbf{f} = [f_{-M} \dots f_0 \dots f_M]^T$ คือเวกเตอร์แนวตั้ง (column vector) ของอีควอไลเซอร์ จำนวนแท็ป (tap) ทั้งหมดของอีควอไลเซอร์เท่ากับ $N = 2M + 1$ สำหรับ $\mathbf{y}_k = [y_{k+M} \dots y_k \dots y_{k-M}]^T$ คือเวกเตอร์แนวตั้งของลำดับข้อมูลสัญญาณอ่านกลับ $\{y_k\}$, $\mathbf{g} = [g_{-1,-1} \ g_{0,-1} \ g_{1,-1} \ g_{-1,0} \ g_{0,0} \ g_{1,0}]^T$ คือเวกเตอร์แนวตั้งของทาร์เก็ตแบบสองมิติ โดยที่ $L = 6$ คือความยาวของทาร์เก็ต และ $\mathbf{a}_k = [(a_{-1,k-1} + a_{1,k-2}) \ a_{0,k} \ (a_{1,k} + a_{-1,k-2}) \ (a_{-1,k-1} + a_{1,k-1}) \ a_{0,k-1} \ a_{0,k-2}]^T$

$$E[w_k^2] = \mathbf{f}^T \mathbf{Y} \mathbf{f} + \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{g} - 2 \mathbf{f}^T \mathbf{X} \mathbf{g} - 2(\lambda \mathbf{I}^T \mathbf{g} - \mathbf{1}) \quad (6)$$

เมื่อ λ คือตัวคูณลากรานจ์ (Lagrange Multiplier), $\mathbf{I} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$, \mathbf{A} คือเมทริกซ์อัตสหสัมพันธ์ (Auto-Correlation Matrix) ขนาด $L \times L$ ของลำดับข้อมูลอินพุต \mathbf{a}_k , \mathbf{Y} คือเมทริกซ์อัตสหสัมพันธ์ขนาด $N \times N$ ของลำดับข้อมูลอินพุต \mathbf{y}_k , และ \mathbf{X} คือเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้าม (Cross-correlation Matrix) ระหว่าง \mathbf{a}_k และ \mathbf{y}_k จากสมการ (6) ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับ \mathbf{f} , \mathbf{g} และ λ และให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ หลังจากนั้นทำการแก้สมการจะทำให้ได้สมการที่ (7) ถึง (8)

$$\lambda = \frac{1}{\mathbf{I}^T (\mathbf{A} - \mathbf{X}^T \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{I}} \quad (7)$$

$$\mathbf{g} = \lambda (\mathbf{A} - \mathbf{X}^T \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{I} \quad (8)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{X} \mathbf{g} \quad (9)$$

สำหรับการตรวจหา SA จะใช้ SA profile ของค่าสัมประสิทธิ์ทาร์เก็ต $g_{-1,0}$ เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ $h_{-1,0}$ ซึ่ง [17] พบว่าเมื่อเกิดผลกระทบจาก SA แล้วค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในกระบวนการตรวจหา SA จะใช้การออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ข้อมูลจำนวน 1 เซกเตอร์ (Sector) จำนวน 4096 บิต เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ $g_{-1,0}$ แล้วจะนำไปเปรียบเทียบกับ $h_{-1,0}$ เพื่อให้ได้ค่าประมาณความรุนแรงของ SA จากนั้นวงจรแก้ไขจะทำการเลือกคู่อาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมกับความรุนแรงของ SA นั้นๆ ไปใช้งาน ซึ่งทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมกับความรุนแรงของ SA จะถูกออกแบบไว้ก่อนหน้าและจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำ



4. การลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาและแก้ไข SA

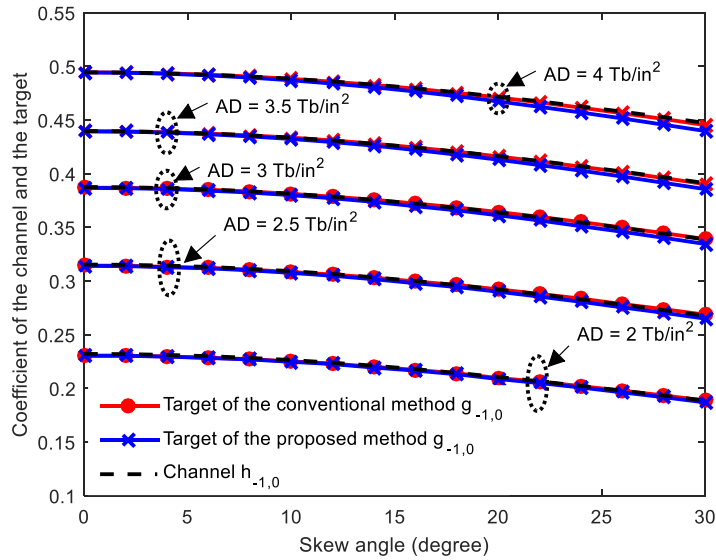
ในทางปฏิบัติการเพิ่มอัตราการอ่านของ HDD สามารถดำเนินการได้โดยการลดความซับซ้อนของระบบประมวลผลสัญญาณของ HDD ซึ่งความซับซ้อนเหล่านี้จะอยู่ที่วงจรถอดรหัส และวงจรตรวจหา หนึ่งในนั้นคือจำนวนสถานะ (State) และเส้นทางสาขา (Branch) ของวงจรตรวจหาวิเทอร์บี ซึ่งจำนวนสถานะและเส้นทางสาขาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของทาร์เก็ตที่นำมาใช้งาน

จาก [17] พบว่าเมื่อเกิดผลกระทบจาก SA จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองอิมพัลส์ของ ช่องสัญญาณ BPMR ที่ตำแหน่ง $h_{-1,1}$ และ $h_{1,-1}$ มีค่าต่ำมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า AD น้อยกว่า 3 Tb/in^2 ดังนั้นในกระบวนการลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาและแก้ไข SA จะทำการบังคับค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ตตำแหน่ง $g_{-1,1}$ และ $g_{1,-1}$ ให้มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะส่งผลให้ขั้นตอนการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ที่ใช้ในขั้นตอนการตรวจหาความรุนแรงของ SA มีความซับซ้อนลดลง อีกทั้งการบังคับให้บางตำแหน่งของทาร์เก็ตเป็นศูนย์จะส่งผลให้ความซับซ้อนของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีลดลงอีกด้วย ดังนั้นเมทริกซ์ของทาร์เก็ตในสมการที่ (4) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (10)

$$G = \begin{bmatrix} g_{-1,-1} & g_{-1,0} & 0 \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ 0 & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

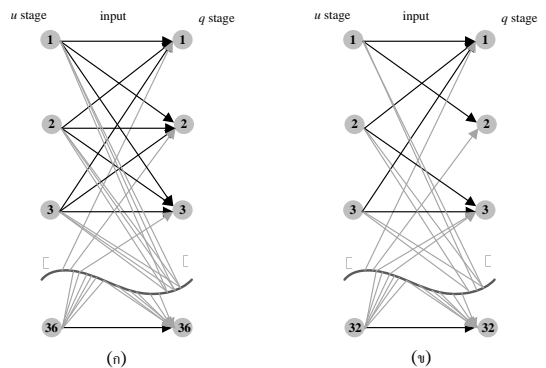
สำหรับกระบวนการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์จะใช้วิธีการตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3 แต่จะแทนค่า $\mathbf{g} = [g_{-1,-1} \ g_{0,-1} \ g_{-1,0} \ g_{0,0} \ g_{0,1}]^T$, $\mathbf{I} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$, $\mathbf{a}_k = [(a_{-1,k} + a_{1,k-2}) \ a_{0,k} \ (a_{-1,k-1} + a_{1,k-1}) \ a_{0,k-1} \ a_{0,k-2}]^T$ และ $L = 5$ จากการที่เวกเตอร์ \mathbf{g} , เวกเตอร์ \mathbf{a}_k และ \mathbf{I} มีความยาวลดลงจาก 6 เหลือ 5 ส่งผลให้การคำนวณค่าทาร์เก็ต $g_{-1,0}$ สำหรับการตรวจหา SA วิธีการที่นำเสนอจึงมีความซับซ้อนต่ำกว่าวิธีที่ไม่ได้มีการลดความซับซ้อน (วิธีที่นำเสนอใน [17])

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรตรวจหา SA ของวงจรที่ไม่มีมีการลดความซับซ้อน [17] ซึ่งจะนิยามว่า “Target of the conventional method $g_{-1,0}$ ” กับวิธีการที่ได้ลดความซับซ้อนที่นำเสนอในบทความนี้ โดยจะนิยามว่า “Target of the proposed method $g_{-1,0}$ ” ซึ่งจะเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ BPMR ณ ตำแหน่ง $h_{-1,0}$ โดยจะนิยามว่า “Channel $h_{-1,0}$ ” จากผลการทดลองพบว่า ณ $AD \leq 3 \text{ Tb/in}^2$ สมรรถนะของวิธีการตรวจหา SA ที่มีการลดความซับซ้อนให้สมรรถนะใกล้เคียงกับระบบที่ไม่ได้มีการลดความซับซ้อน และที่ $AD > 3 \text{ Tb/in}^2$ สมรรถนะของระบบที่มีการลดความซับซ้อนจะมีข้อผิดพลาดมากกว่าระบบที่ไม่ได้ลดความซับซ้อน โดยอย่างยิ่งเมื่อ SA มีค่าสูง ทั้งนี้เพราะว่าระบบที่ลดความซับซ้อนจะบังคับให้ค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ต ณ ตำแหน่ง $g_{-1,1}$ และ $g_{1,-1}$ ให้มีค่าเป็นศูนย์ แต่ที่ AD มากกว่า 3 Tb/in^2 ค่าสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ผลตอบสนองของช่องสัญญาณ BPMR ณ ตำแหน่ง $h_{-1,1}$ และ $h_{1,-1}$ มีค่าสูงมากจนไม่สามารถละทิ้งหรือ ประมาณค่าให้เป็นศูนย์ได้



รูปที่ 3 โปรไฟล์ SA สำหรับการตรวจหา SA ที่ AD = 2, 2.5, 3, 3.5, และ 4 Tb/in²

จากทาร์เก็ตแบบสองมิติที่ได้จากสมการที่ (10) จะทำให้งจรตรวจหาวีเทอร์บีแบบสองมิติที่ใช้สำหรับการตรวจหาลำดับข้อมูลสามารถลดความซับซ้อนของแผนภาพเทรลลิซ (Trellis Diagram) ลงได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าแผนภาพเทรลลิซของ [17] จะใช้สถานะจำนวน 36 สถานะ และมี 6 เส้นสาขา (Branch) ที่ออกจากแต่ละสถานะ สำหรับแผนภาพเทรลลิซของวิธีที่นำเสนอจะใช้จำนวนเพียง 32 สถานะ และมีเพียง 4 เส้นสาขาที่ออกจากแต่ละสถานะเท่านั้น ซึ่งกระบวนการตรวจหาข้อมูลของวงจรตรวจหาวีเทอร์บีต้องคำนวณหาค่าเมตริกสาขา (Branch Metric) ในแต่ละเส้นสาขาสำหรับการเปลี่ยนสถานะ (u, q) จากสถานะ u ไปยังสถานะ q ซึ่งค่าเมตริกสาขาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11)



รูปที่ 4 แผนภาพเทรลลิซ (ก) วิธีที่นำเสนอใน [17] และ (ข) วิธีที่นำเสนอ

$$\lambda_k(u, q) = |z_k - \hat{r}_k(u, q)|^2 \quad (11)$$

เมื่อ $\hat{r}_k(u, q)$ คือข้อมูลเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่สอดคล้องกับ (u, q) เพราะฉะนั้นเมื่อจำนวนสถานะและจำนวนเส้นสาขาลดลง ก็จะทำให้ความซับซ้อนของวงจรตรวจหาวีเทอร์บีลดลงตามไปด้วยเช่นกัน



สำหรับความซับซ้อนที่ลดลงของวงจรตรวจหาวีเทอร์บีจะส่งผลให้ความเร็วของระบบประมวลผลของสัญญาณของช่องสัญญาณอ่านเพิ่มขึ้น กล่าวคือ HDD จะมีอัตราการอ่านที่เพิ่มขึ้น สำหรับการเปรียบเทียบความซับซ้อนของวิธีที่นำเสนอแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบในรูปแบบของตัวดำเนินการบวก/ลบ/เปรียบเทียบ และตัวดำเนินการคูณ/หาร ของวงจรตรวจหาวีเทอร์บี สำหรับการตรวจหาข้อมูล 1 บิต โดยพบว่าวิธีการที่นำเสนอมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการที่นำเสนอ [17] และสามารถลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาวีเทอร์บีได้ถึงร้อยละ 40.7 ซึ่งจะส่งผลให้การตรวจหาข้อมูลของวงจรตรวจหาวีเทอร์บีทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

5. ผลของการจำลองระบบ

พิจารณาแบบจำลอง BPMP ในรูปที่ 2 กำหนดให้ค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: Signal-to-noise Ratio) มีค่าเท่ากับสมการที่ (12)

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma^2} \right) \quad (12)$$

หน่วยเป็นเดซิเบล (dB: Decibel) ในการทดลองนี้แต่ละวิธีจะใช้อีควอไลเซอร์จำนวน 7 แทป (tap) โดยที่ทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์จะถูกออกแบบด้วยหลักการ MMSE ณ SNR ที่ทำให้ได้ค่าอัตราข้อผิดพลาดบิต (Bit-error Rate) BER $\approx 10^{-4}$

ในรูปที่ 5 แสดงผลของการจำลองระบบแบบต่างๆ ที่มีผลกระทบจาก SA = 20° ณ AD = 2.5 และ 3 Tb/in² เมื่อกำหนดให้ “Conventional Method” คือสมรรถนะ

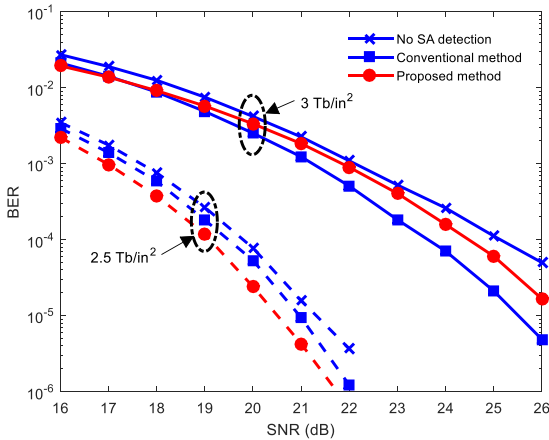
ตารางที่ 1 ความซับซ้อนของวิธีที่นำเสนอและวิธี [17] ของวงจรตรวจหาวีเทอร์บี สำหรับการตรวจหาข้อมูล 1 บิต

วิธี	จำนวนตัวดำเนินการบวก/ลบ/เปรียบเทียบ	จำนวนตัวดำเนินการคูณ/หาร
วิธีที่นำเสนอ	384	128
วิธี [17]	648	216

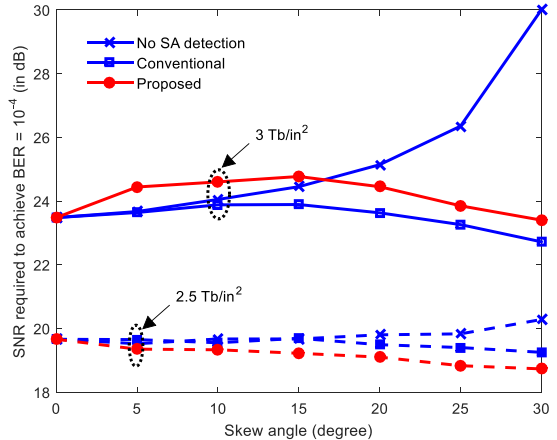
ของวิธีการที่นำเสนอใน [17] สำหรับ “Proposed method” คือสมรรถนะของวิธีการที่ลดความซับซ้อนที่นำเสนอในบทความนี้ และ “No SA Detection” คือระบบที่ไม่มีการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบจาก SA จากการทดลองพบว่าที่ AD = 2.5 Tb/in² “Proposed Method” ให้สมรรถนะที่ดีกว่า “Conventional method” ทั้งนี้เนื่องจากการเกิด SA จะส่งผลให้ผลกระทบจาก ITI ลดลง (SA เพิ่มขึ้น ITI ลดลง [17]) จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ผลตอบสนองของช่องสัญญาณ BPMP ที่ตำแหน่ง $h_{-1,1}$ และ $h_{1,-1}$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นการที่บังคับให้ทาร์เก็ตในตำแหน่ง $g_{-1,1}$ และ $g_{1,-1}$ มีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้ “Proposed Method” ที่ AD ต่ำ มีสมรรถนะดีกว่า “Conventional Method” อย่างไรก็ตามเมื่อ AD เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ผลตอบสนองของช่องสัญญาณ BPMP ที่ตำแหน่ง $h_{-1,1}$ และ $h_{1,-1}$ จะมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นการบังคับให้ทาร์เก็ตในตำแหน่ง $g_{-1,1}$ และ $g_{1,-1}$ มีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้ “Proposed Method” มีสมรรถนะด้อยกว่า “Conventional Method” อย่างไรก็ตาม “Proposed Method” ยังให้สมรรถนะที่ดีกว่า “No SA Detection”



บทความวิจัย



รูปที่ 5 สมรรถนะของระบบที่ผลกระทบจาก SA = 20° ณ AD = 2.5 และ 3 Tb/in²



รูปที่ 6 สมรรถนะของระบบต่างๆ ในรูปแบบของ SNR ที่ทำให้ได้ BER = 10^{-4} เทียบกับความรุนแรงของ SA ต่างๆ ที่ 2.5 Tb/in² และ 3 Tb/in²

รูปที่ 6 แสดงสมรรถนะของระบบต่างๆ ในรูปแบบของ SNR ที่ทำให้ได้ BER = 10^{-4} กับความรุนแรงของ SA ต่างๆ ที่ค่า AD = 2.5 และ 3 T/in² จากการทดลองพบว่าที่ AD = 2.5 T/in² "Proposed Method" ให้สมรรถนะที่ดีกว่า "Conventional Method" ในทุกความรุนแรงของ SA ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ SA = 25° "Proposed Method" สามารถให้สมรรถนะที่ดีกว่า "Conventional Method" สูงสุด (ประมาณ 0.57 dB) อย่างไรก็ตามเมื่อ AD มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3 T/in² "Proposed Method" จะมีสมรรถนะด้อยกว่า "Conventional Method" และที่ความรุนแรงของ SA ต่ำกว่า 20° "Proposed Method" จะมีสมรรถนะด้อยกว่า "No SA Detection" กล่าวคือ "Proposed Method" มีสมรรถนะด้อยกว่า "Conventional Method" ประมาณ 0.8 dB ที่ SA = 15°

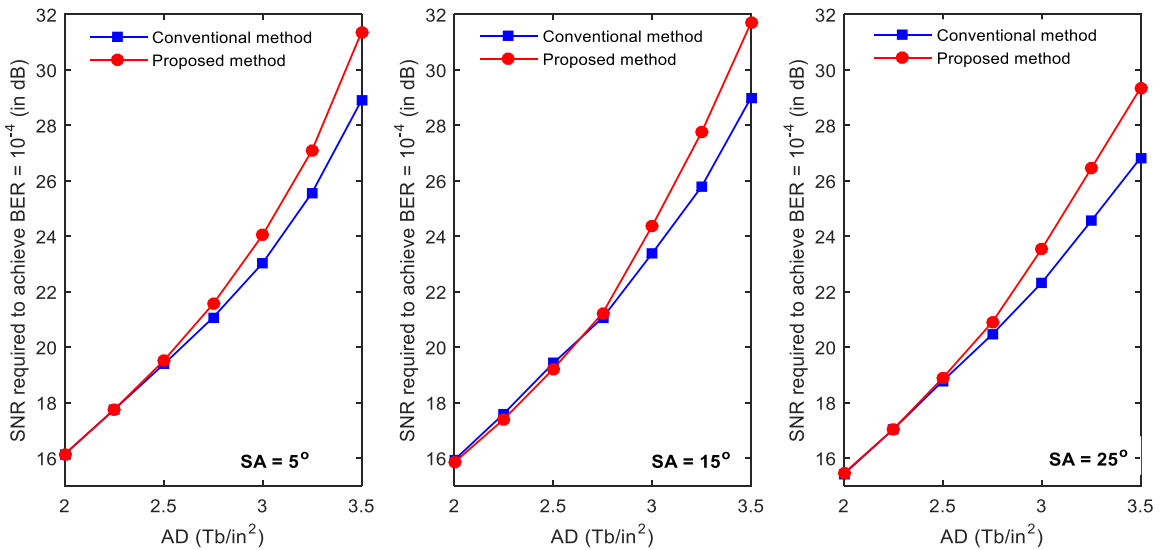
ในรูปที่ 7 แสดงมรรถนะของระบบต่างๆ ณ SNR ที่ทำให้เกิด BER = 10^{-4} เมื่อมีผลกระทบจาก SA = 15°

พบว่าสมรรถนะของ "Proposed Method" ใกล้เคียงกับ "Proposed Method" เมื่อ AD น้อยกว่า 2.5 Tb/in² และเมื่อ AD มากกว่า 2.5 Tb/in² สมรรถนะของ "Proposed Method" จะดีกว่า ทั้งนี้เพราะว่ายิ่งค่า AD สูงๆ ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ BPMR ในตำแหน่ง $\{h_{-1,-1} \ h_{-1,1} \ h_{1,-1} \ h_{1,1}\}$ มีค่าสูงจนไม่สามารถที่จะได้ ดังนั้นถ้าบังคับให้ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์จะส่งผลให้สมรรถนะของระบบด้อยลง

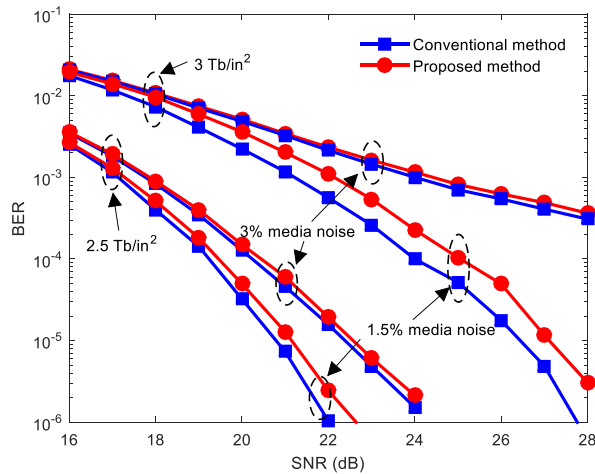
นอกจากนี้ รูปที่ 8 ยังได้แสดงสมรรถนะของระบบที่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนรบกวนสีบ้นที่ที่ 1.5% และ 3% ที่ความรุนแรงของ SA = 15° และในรูปที่ 9 ได้แสดงสมรรถนะของระบบต่างๆ ที่มีผลกระทบจาก SA = 15° และ SA = 25° ณ ความรุนแรงของสัญญาณรบกวนรบกวนสีบ้นที่ที่ค่าต่างๆ ที่ AD = 2.5 Tb/in² และ 3 Tb/in² จากผลการทดลองพบว่า "Proposed Method" ทนทานเมื่อระบบเผชิญกับสัญญาณรบกวนรบกวนสีบ้นที่ที่



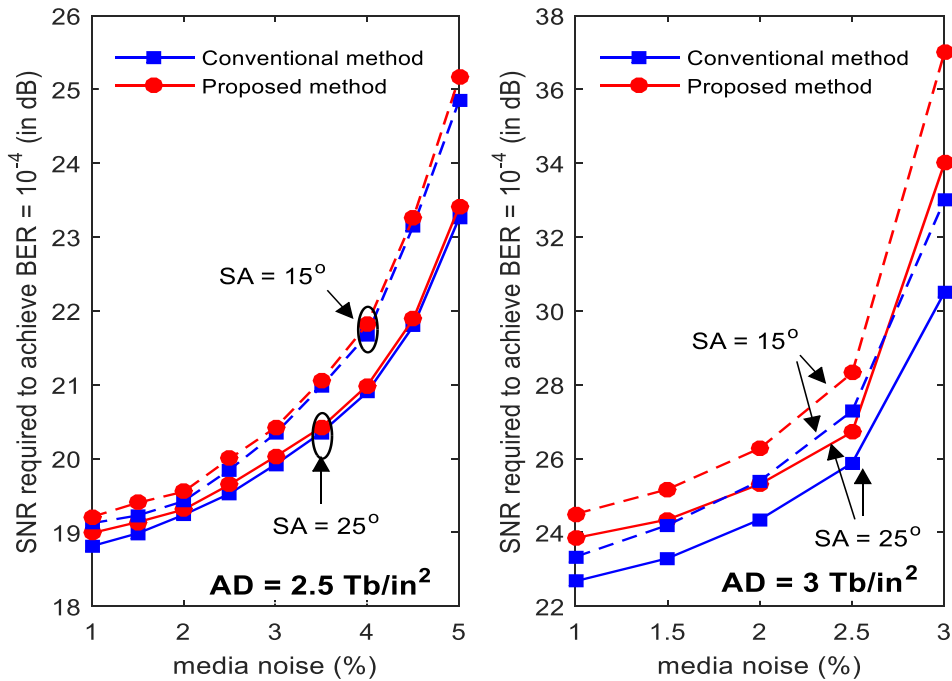
บทความวิจัย



รูปที่ 7 สมรรถนะของระบบต่างๆ ณ SNR ที่ทำให้เกิด BER = 10^{-4} เมื่อมีผลกระทบจาก SA = 5° , 15° และ 25° ที่ค่า AD ต่างๆ



รูปที่ 8 สมรรถนะของระบบต่างๆ ที่มีผลกระทบจาก SA = 15° และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกที่ 1.5% และ 3% ที่ AD = 2.5 Tb/in^2 และ 3 Tb/in^2



รูปที่ 9 สมรรถนะของระบบต่างๆ ที่มีผลกระทบจาก $SA = 15^\circ$ และ $SA = 25^\circ$ ณ ความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสี่อันดับที่ค่าต่างๆ ที่ $AD = 2.5 \text{ Tb/in}^2$ และ 3 Tb/in^2

6. บทสรุป

BPMR เป็นเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลของ HDD ที่จะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยี PMR ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเทคโนโลยี PMR ไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้ เนื่องจากขีดจำกัดทางซูเปอร์พาราแมกเนตริก อย่างไรก็ตามระบบ BPMR ต้องเผชิญกับผลกระทบจาก ITI, ISI, สัญญาณรบกวนสี่อันดับ, และการเอียงของหัวอ่าน เป็นต้น ผลกระทบเหล่านี้ทำให้สมรรถนะของระบบด้อยลงเป็นอย่างมาก ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนของวงจรตรวจหาและแก้ไขที่ได้นำเสนอไว้ใน [17] จากการลดความซับซ้อนทำให้สามารถลดจำนวนสถานะและ

เส้นสาขาของแผนภาพเทอร์ลิสที่ใช้ในวงจรตรวจหาวิเทอร์บี จาก 36 สถานะและ 6 เส้นสาขา เหลือเพียง 32 สถานะและ 4 เส้นสาขา โดยจากการทดลองพบว่าที่ AD น้อยกว่า 2.5 Tb/in^2 ระบบที่ลดความซับซ้อนจะให้สมรรถนะที่ใกล้เคียงกับระบบที่ไม่ได้มีการลดความซับซ้อน อย่างไรก็ตามเมื่อ AD มีค่ามากกว่า 2.5 Tb/in^2 ระบบที่ลดความซับซ้อนจะให้สมรรถนะที่ด้อยกว่าระบบที่ไม่ได้มีการลดความซับซ้อน เพราะเวลาที่ AD มากกว่า 2.5 Tb/in^2 ค่าสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ของช่องสัญญาณ BPMR จะมีค่าสูงเกินกว่าที่จะละทิ้งหรือบังคับให้เป็นศูนย์ได้ ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงเหมาะสมสำหรับใช้ในระบบ BPMR ที่มีค่า AD ต่ำกว่า 2.5 Tb/in^2



7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม หมายเลขทุน TSRI_65_6.1

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Ali, J. Qadir, R. Rasool, A. Sathiaselan, A. Zwitter, and J. Crowcroft, Big data for development: Applications and techniques, Big Data Analytic, 2016, (1), 2.
- [2] J. Lin, R. Luley, and K. Xiong, Active learning under malicious mislabeling and poisoning attacks, 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Proceeding, 2021, 1-6.
- [3] D.S. Kuo, K.Y. Lee, X.M. Yang, S. Xiao, Y. Hsu, Z. Yu, M. Feldbaum, T. Klemmer, Y. Kubota, J.-U. Thiele, P. Steiner, K. Wago, S. Dallorto and D. Olynick Heated dot magnetic recording media - Path to 10 TDOTS/in², 2016 International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS), Proceeding, 2016, 1.
- [4] S. Koonkamkhai, P. Keeratiwintakom, and P. Kovintavewat, Target and equalizer design for high-density bit-patterned media recording, ECTI-CIT Transactions, 2012, 6(2), 128-135.
- [5] Y. Wang and B.V.K.V. Kumar, Improved multitrack detection with hybrid 2-d equalizer and modified Viterbi detector, IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(10), 1- 10.
- [6] S. Koonkamkhai, C. Warisam and P. Kovintavewat, An iterative two-head two-track detection method for staggered bit-patterned magnetic recording systems, IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7), 1-7.
- [7] T. Wu, M.A. Armand and J.R. Cruz, Detection-decoding on BPMR channels with written-in error correction and ITI mitigation, IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(1), 1-11.
- [8] L.M.M. Myint, P. Supnithi, and P. Tantaswadi, An inter-track interference mitigation technique using partial ITI estimation in patterned media storage, IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10), 3691-3694.
- [9] S. Nabavi, B.V.K.V. Kumar, and J.G. Zhu, Modifying Viterbi algorithm to mitigate intertrack interference in bit-patterned media, IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6), 2274-2276.
- [10] S. Nabavi, B.V.K.V. Kumar and J.A. Bain, Mitigating the effects of track mis-registration in bit-patterned media, 2008 IEEE International Conference on Communications, Proceeding, 2008, 2061-2065.



- [11] L. Alink, J.P.J. Groenland, J. de Vries and L. Abelmann, Determination of bit patterned media noise based on island perimeter fluctuations, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11), 4574-4577.
- [12] Y. Ng, B.V.K.V. Kumar, K. Cai, S. Nabavi, and T.C. Chong, Picket-shift codes for bit-patterned media recording with insertion/ deletion errors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(6), 2268-2271.
- [13] A.R. Iyengar, P.H. Siegel and J.K. Wolf, Write channel model for bit-patterned media recording, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(1), 35 -45.
- [14] Z. He, J. Mou, K.S. Chan, S.H. Lam and W. Lin, A near zero skew actuation mechanism for hard disk drives, *Microsystem Technologies*, 2015, 21(1), 131-137.
- [15] Z. He, J. Mou and K.S. Chan, Mechanisms of minimum skew angle actuation for hard disk drives, *The 3rd International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICMA 2015)*, Proceeding, 2016, 02002.
- [16] K. Kankhunthod, C. Warisarn, S. Koonkarnkhai, and P. Kovintavewat, Multilayer perceptron-based skew-angle estimation for bit-patterned magnetic recording, *The 36th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2021)*, Proceeding, 2021, 1-3.
- [17] S. Koonkarnkhai, C. Warisarn and P. Kovintavewat, A simple skew angle detection and suppression method for bit-patterned magnetic recording, *AIP Advances*, 2021, 11(1), 015229.
- [18] S. Nabavi and B.V.K.V. Kumar, Two-dimensional generalized partial response equalizer for bit-patterned media, *IEEE International Conference on Communications*, Proceeding, 2007, 6249-6254.
- [19] J. Moon and W. Zeng, Equalization for maximum likelihood detector, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, 31(2), 1083-1088.

การติดตามคุณภาพน้ำผิวดินของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ขนิษฐา บุตรดี¹ อรัญญา เวชสาร¹ อินทิรา อินทร์เลิศ¹ สิทธิชัย ใจพาน^{1*} และ
นุกุล มงคล²

¹ กลุ่มวิชาสาธารณสุขศาสตร์, วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² สำนักงานบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ: 31 มีนาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 9 สิงหาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 19 สิงหาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: การวิจัยเชิงสำรวจนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาดัชนีคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำผิวดิน (WQI) ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีโดยการสำรวจจากแหล่งน้ำผิวดินทั้ง 11 แห่ง ในเดือนสิงหาคม-กันยายน 2564 วิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำผิวดินด้วยลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ จำนวน 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ออกซิเจนละลายน้ำ (mg/l) ความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (mg/l) แอมโมเนีย (mg/l) และแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหลาย (MPN/100ml) แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (MPN/100ml) นำเสนอข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัย พบว่า ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ (WQI) อยู่ในช่วง 40-67 คะแนน คุณภาพน้ำผิวดินอยู่ในระดับเสื่อมโทรม จำนวน 6 แหล่ง (ร้อยละ 54.55) และคุณภาพน้ำผิวดินอยู่ในระดับพอใช้ จำนวน 5 แหล่ง (ร้อยละ 45.45) ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ได้เป็นประโยชน์ในการเฝ้าระวัง ติดตามคุณภาพน้ำและการบริหารจัดการน้ำของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

คำสำคัญ: คุณภาพน้ำผิวดิน; ดัชนีคุณภาพน้ำ; คุณภาพน้ำ; มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Monitoring of Surface Water Quality at Ubon Ratchathani University

Khanidta Bootdee¹, Arunya Wetchasan¹, Intira Inlerd¹, Sitthichai Chaikhan^{1*} and Nukul Mongkol²

¹ College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

² Office of Physical and Environment Management, Ubon Ratchathani University

* Corresponding author, E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

Received: 31 March 2022; Revised: 9 August 2022; Accepted: 19 August 2022

Online Published: 18 December 2022

Abstract: The objective of this survey research was to study the water quality index (WQI) of surface water resources at Ubon Ratchathani University through the survey of 11 surface water sources from August to September 2021. The WQI was analyzed using physical, chemical, and biological characteristics of five parameters: dissolved oxygen (mg/L), biochemical oxygen demand (BOD) (mg/L), ammonia (mg/L), coliform bacteria (MPN/100 mL), and fecal coliform bacteria (MPN/100 mL). We used descriptive statistics, including frequency, percentage, mean, and standard deviation, to present the data. The results showed that the WQI was between 40 and 67 points. Six (54.55%) of the sources surveyed had harmful surface water quality, and five (45.45%) had acceptable surface water quality. This information about water quality is helpful for the surveillance, monitoring, and management of the water resources at Ubon Ratchathani University.

Keywords: Surface water quality; Water Quality Index (WQI); Water Quality; Ubon Ratchathani University



1. บทนำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำรงชีวิตทั้งการนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค น้ำที่ผ่านการใช้แล้วมักมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีกระบวนการบำบัด จะทำให้ระบบหมุนเวียนน้ำในธรรมชาติเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมขึ้น โดยเฉพาะการปล่อยน้ำทิ้งที่ผ่านการใช้ในครัวเรือน การเกษตร และการอุตสาหกรรมในอัตราสูง หากมีความสกปรกปริมาณมากเกินไป ความสามารถที่แหล่งรับน้ำธรรมชาติจะปรับตัวได้ทัน จะทำให้แหล่งน้ำผิวดินมีคุณภาพลดลงและกลายเป็นแหล่งน้ำที่เน่าเสียในที่สุด [1] ผลการศึกษาคุณภาพน้ำของกรมควบคุมมลพิษประจำปี 2564 พบว่าสถานการณ์คุณภาพน้ำผิวดินมีแนวโน้มดีขึ้น คุณภาพน้ำ 59 แหล่งน้ำไหล และ 6 แหล่งน้ำนิ่ง ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์พอใช้ ร้อยละ 46 (เพิ่มขึ้นจากปี 2563) รองลงมาอยู่ในเกณฑ์ดี ร้อยละ 40 (เพิ่มขึ้นจากปี 2563) ส่วนเกณฑ์เสื่อมโทรมลดลงเหลือ ร้อยละ 14 (ลดลงจากปี 2563) แหล่งน้ำที่มีคุณภาพน้ำที่อยู่ในเกณฑ์ดี 5 อันดับแรก ได้แก่ ตาปีตอนบน หนองหารเพชรบุรีตอนบน กุยบุรี และปราณบุรี นอกจากนี้ยังมีแหล่งน้ำที่มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม 5 อันดับแรก ได้แก่ เจ้าพระยาตอนล่าง ลำตะคองตอนล่าง ทำจันทอนล่าง กวาง และลพบุรี ซึ่งพบว่าแหล่งน้ำที่อยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม โดยปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำในแหล่งน้ำเหล่านี้ เช่น การระบายน้ำทิ้งจากชุมชนเมือง พื้นที่เกษตรกรรม (นาข้าว) การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และการปศุสัตว์ที่ไม่มีระบบการจัดการของเสีย และการระบายน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่หนาแน่น

กิจกรรมทางเรือท่องเที่ยว เป็นต้น ทั้งนี้ ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2560 - 2564) คุณภาพน้ำของแหล่งน้ำมีแนวโน้มดีขึ้น ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์พอใช้ถึงดี และไม่มีแหล่งน้ำที่อยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรมมาก [2]

การประเมินคุณภาพของแหล่งน้ำโดยใช้ดัชนีคุณภาพน้ำ (WQI) จึงถูกนำมาใช้ตรวจสอบว่าแหล่งน้ำใดมีคุณภาพตามเกณฑ์การประเมิน และจัดลำดับคุณภาพของแหล่งน้ำ โดยดัชนีคุณภาพน้ำมีค่าคะแนนตั้งแต่ 0 - 100 คะแนน แบ่งเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับเสื่อมโทรมมาก ระดับเสื่อมโทรม ระดับพอใช้ ระดับดี และระดับดีมาก ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในการประเมินคุณภาพแหล่งน้ำตามมาตรา 32 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 การติดตามคุณภาพน้ำด้วยดัชนีชนิดนี้จึงมีประโยชน์ในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม เพื่อติดตามและอนุรักษ์น้ำให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เหมาะสมตามคุณลักษณะและประเภทของแหล่งน้ำ [3] ทั้งนี้กรมควบคุมมลพิษจึงได้มีการจัดทำระบบฐานข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ (IWIS) ผ่านเว็บไซต์ <http://iwis.pcd.go.th/> โดยมีจุดตรวจวัดคุณภาพน้ำของกรมควบคุมมลพิษ จำนวน 366 จุด และของสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค จำนวน 269 จุด จาก 48 แม่น้ำ และ 4 แหล่งน้ำนิ่ง ดัชนีคุณภาพน้ำมีจุดมุ่งหมายที่จะให้ค่าเดียว เพื่อให้ประชาชนและหลายหน่วยงานได้นำแนวคิดนี้ไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำและนำไปใช้ในการวางแผนแก้ไขปัญหาด้านแหล่งน้ำผิวดิน ทำให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลายในการประเมินคุณภาพคุณภาพน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน [4-8]



มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีการให้บริการในการเรียนการสอน จำนวน 10 คณะ และ 1 วิทยาลัย มีนักศึกษาในระดับอุดมศึกษาในปีการศึกษา 2564 จำนวน 13,832 คน [9] การใช้น้ำในการทำกิจกรรมต่าง ๆ จึงมีความสำคัญในการดำรงชีวิตของทุกคนภายในมหาวิทยาลัย นอกจากนี้มีแหล่งน้ำผิวดินมีเพียงหนึ่งแห่งที่สามารถระบุแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่ชัดเจนได้ คือ อ่างเก็บน้ำบริเวณ 70 ไร่ ซึ่งรับน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงอาหารกลาง ซึ่งมีทั้งที่ถูกระบายทิ้งออกสู่ภายนอกมหาวิทยาลัยและเก็บกักไว้ใช้ประโยชน์ในงานสวนของสำนักบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม กระบวนการเหล่านี้จึงทำให้แหล่งน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งกับการดำเนินงานภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ทั้งนี้แหล่งน้ำผิวดินที่สำคัญของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จำนวน 11 แห่ง [10] จากสถานการณ์ที่ผ่านมามีการดำเนินงานตรวจสอบคุณภาพน้ำที่สำคัญเพียง 2 ส่วน ได้แก่ แหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา 1 แห่ง และระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จึงยังไม่ได้มีการดำเนินงานเฝ้าระวังคุณภาพน้ำผิวดินในแหล่งอื่น ๆ การที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีการดำเนินงานตามนโยบายมหาวิทยาลัยสีเขียว การนำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินและน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์หมุนเวียนภายในสถาบัน เช่น การเพาะปลูก การผลิตน้ำประปา การล้างเครื่องจักรและยานพาหนะ เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการติดตามสถานการณ์ด้านคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำต่าง ๆ ก่อนนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากแหล่งน้ำผิวดินหลายแหล่งมีการรับน้ำทิ้งจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของนักศึกษาและบุคลากร โดยเฉพาะในเขตพื้นที่การศึกษาที่มีอาคารเรียน

สำนักงาน โรงอาหารและร้านค้าเป็นจำนวนมาก หากไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมตามคุณภาพและประเภทของแหล่งน้ำ อาจทำให้สูญเสียน้ำที่มีคุณภาพดีไปอย่างสูญเปล่าและเป็นการกระจายน้ำคุณภาพเสื่อมโทรมไปยังพื้นที่โดยรอบ

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบฐานข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศของกรมควบคุมมลพิษเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาคุณภาพน้ำผิวดินของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีในปัจจุบัน เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปกำหนดแนวทางการใช้ประโยชน์ให้มีความเหมาะสมกับคุณภาพน้ำผิวดินในแหล่งน้ำต่าง ๆ ตามแนวนโยบายมหาวิทยาลัยสีเขียวของมหาวิทยาลัยต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยที่ออกแบบแผนการวิจัยในลักษณะงานวิจัยเชิงสำรวจ เพื่อศึกษาดัชนีคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำผิวดินของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยจัดคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินด้วยดัชนีคุณภาพน้ำ (WQI) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่บ่งชี้สถานการณ์สิ่งแวดล้อมทางน้ำได้

2.1 พื้นที่ดำเนินการศึกษา

แหล่งน้ำผิวดินของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีลักษณะเป็นอ่างเก็บน้ำและหนองน้ำต่าง ๆ ที่อยู่ในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จำนวน 11 แห่ง (รูปที่ 1) โดยมีสถานที่ทดสอบตัวอย่างน้ำ คือ ห้องปฏิบัติการด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมวิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ

วิธีการเก็บน้ำตัวอย่างแบบจ้วง (Grap Sampling) โดยเก็บน้ำตัวอย่างตามหลักการเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินของคู่มือวิธีปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ [11] โดยเก็บตัวอย่างที่จุดกึ่งกลางความกว้างของแหล่งน้ำที่ระดับความลึก 1 เมตร ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างน้ำ (Water Sampler) ขนาด 1 ลิตร (สำหรับการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบทางชีวภาพใช้วิธีเก็บตัวอย่างแบบปลอดเชื้อจากตัวอย่างน้ำที่ความลึก 30 เซนติเมตร) โดยเก็บตัวอย่างปริมาตรอย่างน้อย 10 ลิตรต่อแหล่งน้ำ (แหล่งละ 3 ซ้ำ)

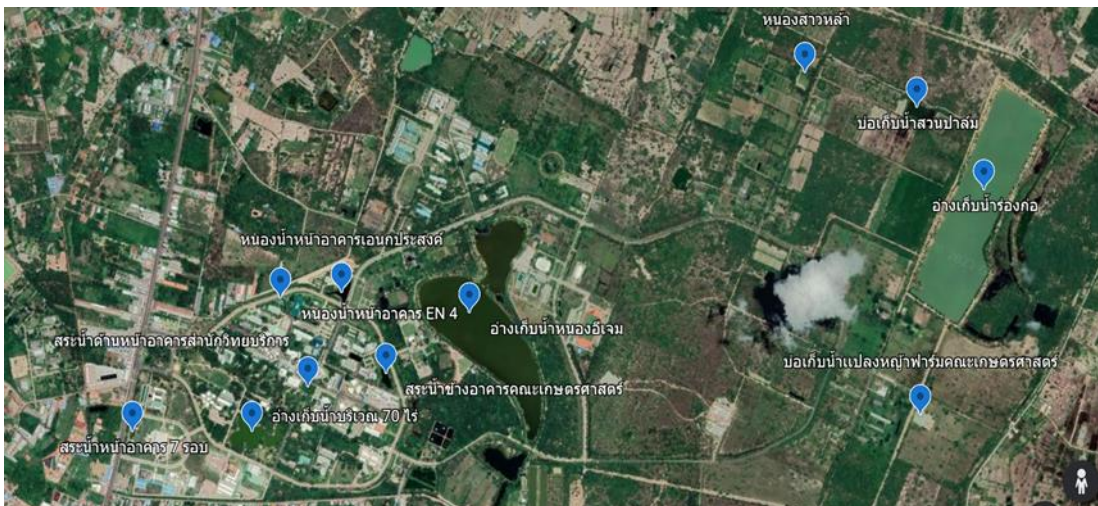
2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทบทวนเอกสารและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเครื่องมือเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 แบบบันทึกข้อมูลทั่วไปของแหล่งน้ำผิวดิน

มีทั้งหมด 4 ข้อ ได้แก่ ได้แก่ ชื่อแหล่งน้ำ ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ (X,Y) ความจุของแหล่งน้ำ และการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำ

ส่วนที่ 2 เครื่องมือตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และวิธีการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ จำนวน 8 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความเป็นกรดด่าง (pH) ความขุ่น (Turbidity) สี (Color) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD) แอมโมเนีย (NH₃-N) แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหลาย (Total Coliform Bacteria; TCB) และ แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform Bacteria; FCB) และเก็บรักษาสภาพตัวอย่างน้ำตามวิธีทดสอบมลพิษทางน้ำ [12] (ตารางที่ 1) โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ ในทุกพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หัตถ์ดัชนีคุณภาพน้ำ (DO, BOD, NH₃-N, TCB และ FCB)



รูปที่ 1 แหล่งน้ำผิวดินที่ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (จำนวน 11 แห่ง)



ตารางที่ 1 การรักษาสภาพตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจำแนกตามพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	หน่วย	การรักษาสภาพ	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรดต่าง (pH)	-		Electrometric*
ความขุ่น (Turbidity)	NTU	ทดสอบทันที	Turbidity meter***
สี (Color)	Pt-Co		Color meter***
ออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	mg/l	ทดสอบภายใน 15 นาที	Azide modification*
ความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD)	mg/l	เติม H ₂ SO ₄ ที่ pH < 2 ในที่มีด 4 °C ไม่เกิน 6 ชม.	Azide modification*
แอมโมเนีย (NH ₃ -N)	mg/l	เติม H ₂ SO ₄ ที่ pH < 2 ในที่มีด 4 °C ไม่เกิน 7 วัน	Indirect (ISE)**
แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform Bacteria)	MPN/100ml	เก็บตัวอย่างแบบปลอดเชื้อ ในที่มีด อุณหภูมิ 4 °C	Multiple Tube Fermentation Technique*
แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform Bacteria)	MPN/100ml	เก็บตัวอย่างแบบปลอดเชื้อ ในที่มีด อุณหภูมิ 4 °C	Multiple Tube Fermentation Technique*

* คือ วิธีมาตรฐานตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

** คือ ไม่มีวิธีมาตรฐานเฉพาะที่กำหนดตามประกาศฯ

*** คือ วิธีประยุกต์จาก The Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Method 4500NH3E

2.4 การควบคุมคุณภาพในการทดสอบ

ผู้วิจัยมีการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือทางห้องปฏิบัติการ โดยผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบเครื่องมือ เพื่อให้มีความพร้อมในการใช้งาน (Calibrate) ของเครื่องก่อนการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุกครั้ง

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ข้อมูลทั่วไปของแหล่งน้ำ

ข้อมูลทั่วไปของแหล่งน้ำใช้เขียนบรรยายเชิงพรรณนาในการอธิบายผลการศึกษาและปริมาณการปนเปื้อนในรายพารามิเตอร์ ได้แก่ DO, BOD, NH₃-N, TCB และ FCB ใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.2 ดัชนีคุณภาพน้ำผิวดิน

ดัชนีคุณภาพน้ำผิวดิน (Water Quality Index, WQI) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยระบบฐานข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ (IWIS) จากค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำ จำนวน 5 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย DO, BOD, NH₃-N, TCB และ FCB (เข้าใช้งานในรูปแบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ฐานข้อมูลคุณภาพน้ำฯ [4] (รูปที่ 2) โดยมีค่าคะแนนระหว่าง 0 ถึง 100 คะแนน เกณฑ์การแปลผลคุณภาพน้ำ แบ่งเป็น 5 ระดับ ได้แก่ คุณภาพน้ำดีมาก (91-100 คะแนน) คุณภาพน้ำดีมาก (71-90 คะแนน) คุณภาพน้ำพอใช้ (61-70 คะแนน) คุณภาพน้ำเสื่อมโทรม (31-60 คะแนน) และคุณภาพน้ำเสื่อมโทรมมาก (0-30 คะแนน)

3.3 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับดัชนีคุณภาพน้ำ

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ DO, BOD, NH₃-N, TCB และ FCB ด้วยสถิติการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และวิเคราะห์ และวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยดัชนีคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทั้ง 11 แห่ง ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

4. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 ข้อมูลทั่วไปของแหล่งน้ำผิวดิน

แหล่งน้ำผิวดินที่ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จำนวน 11 แห่ง ประกอบด้วย อ่างเก็บน้ำหนองฮีเจม (SW1), อ่างเก็บน้ำร่องก่อ (SW2), อ่างเก็บน้ำบริเวณ

70 ไร่ (SW3), หนองน้ำหน้าอาคารอเนกประสงค์ (SW4), หนองน้ำหน้าอาคาร EN 4 (SW5), หนองสาวหล้า (SW6), บ่อเก็บน้ำสวนปาล์ม (SW7), สระน้ำด้านหน้าอาคาร 7 รอบ (SW8), สระน้ำอาคารคณะเกษตรศาสตร์ (SW9), สระน้ำด้านหน้าอาคารสำนักวิทยบริการ (SW10) และ บ่อเก็บน้ำแปลงหญ้าฟาร์มคณะเกษตรศาสตร์ (SW11)

ด้านการใช้ประโยชน์มีการนำไปใช้ผลิตน้ำประปา และนำไปใช้ในการรดน้ำต้นไม้ มี 2 แหล่ง คือ อ่างเก็บน้ำหนองฮีเจม (SW1) และ อ่างเก็บน้ำร่องก่อ (SW2) ส่วนที่เหลือแหล่งน้ำที่เน้นการใช้ประโยชน์เพื่อการรดน้ำต้นไม้ จำนวน 8 แห่ง มีเพียงหนึ่งแห่งที่สามารถระบุข้อมูลการเป็นพื้นที่รับน้ำทิ้งจากอาคารได้ คือ อ่างเก็บน้ำบริเวณ 70 ไร่ ซึ่งรับน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงอาหารกลาง (ตารางที่ 2)



รูปที่ 2 การประเมินดัชนีคุณภาพน้ำโดยใช้ระบบฐานข้อมูล IWIS



ตารางที่ 2 ข้อมูลทั่วไปของแหล่งน้ำผิวดินมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

จุด	ชื่อแหล่งน้ำ	ความจุ (ลบ.ม.)	พิกัดทางภูมิศาสตร์	การใช้ ประโยชน์
SW1	อ่างเก็บน้ำหนองอีเจม	872,600.40	X=15.124571 Y=104.911753	ประปา/รดน้ำ ต้นไม้
SW2	อ่างเก็บน้ำร่องก่อ	477,015.00	X=15.137711 Y=104.933081	ประปา/ เกษตรกรรม
SW3	อ่างเก็บน้ำบริเวณ 70 ไร่	96,000.00	X=15.116762 Y=104.905470	รดน้ำต้นไม้
SW4	หนองน้ำหน้าอาคารเอนกประสงค์	5,468.31	X=15.123434 Y=104.907060	รดน้ำต้นไม้
SW5	หนองน้ำหน้าอาคาร EN 4	3,491.08	X=15.122098 Y=104.904688	รดน้ำต้นไม้
SW6	หนองสาวหล้า	12,866.37	X=15.139530 Y=104.922558	เกษตรกรรม
SW7	บ่อเก็บน้ำสวนป่าลัม	19,770.00	X=15.140065 Y=104.928124	เกษตรกรรม
SW8	สระน้ำด้านหน้าอาคาร 7 รอบ	4,281.60	X=15.114762 Y=104.900644	รดน้ำต้นไม้
SW9	สระน้ำอาคารคณะเกษตรศาสตร์	5,016.00	X=15.121118 Y=104.910217	รดน้ำต้นไม้
SW10	สระน้ำอาคารสำนักวิทยบริการ	4,903.89	X=15.119414 Y=104.907241	รดน้ำต้นไม้
SW11	บ่อเก็บน้ำแปลงหญ้าฟาร์ม คณะเกษตรศาสตร์	8,250.00	X=15.128958 Y=104.933081	เกษตรกรรม

4.2 คุณภาพน้ำผิวดิน

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดินระหว่างเดือนสิงหาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2564 พบว่า ลักษณะทางกายภาพจากแหล่งน้ำผิวดิน 11 แห่ง ได้แก่ อุณหภูมิ (28.5-32.2°C) ความเป็นกรดต่าง (5.87-7.9) ความขุ่น (7.32-49.4 NTU) และสี (53.0-456.0 Pt-Co) (ตารางที่ 3) ลักษณะทางเคมี ได้แก่ ออกซิเจนละลายน้ำ (5.3-9.0 mg/l) ความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (2.0-3.1 mg/l) แอมโมเนีย (0.01-0.34 mg/l) ลักษณะทางชีวภาพ ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหลาย

(533-24,000 MPN/100ml) แบคทีเรียกลุ่มฟิคอลโคลิฟอร์ม (500-24,000 MPN/100ml) (ตารางที่ 4)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ทุกแห่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.80 – 9.03 mg/l เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินประเภท 3-4 ที่กำหนดให้ออกซิเจนละลายน้ำต้องไม่น้อยกว่า 4.0 และ 2.0 mg/l น้ำในธรรมชาติทั่วไปปกติจะมีออกซิเจนละลายน้ำประมาณ 5 - 7 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) [13] ดังนั้นแหล่งน้ำทั้ง 11 แห่งจึงมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ



ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของแหล่งน้ำผิวดิน (N=22)

จุด	เดือนสิงหาคม				เดือนกันยายน			
	อุณหภูมิ (°C)	ความเป็นกรดต่าง	ความขุ่น (NTU)	สี (Pt-Co)	อุณหภูมิ (°C)	ความเป็นกรดต่าง	ความขุ่น (NTU)	สี (Pt-Co)
SW1	31.6	7.0	7.3	179.0	29.2	6.7	6.2	204.0
SW2	32.2	7.9	21.1	155.0	29.3	7.8	17.5	186.0
SW3	29.9	7.8	10.5	143.0	31.1	6.8	9.7	122.0
SW4	29.1	6.8	16.7	430.0	28.6	5.8	14.7	465.0
SW5	32.0	6.5	12.0	176.0	28.5	6.4	13.9	269.0
SW6	32.1	6.4	10.6	53.0	29.2	7.2	11.0	188.0
SW7	30.2	7.1	18.1	226.0	29.1	7.5	21.1	278.0
SW8	31.0	7.3	8.0	114.0	30.0	7.2	3.2	183.0
SW9	29.8	6.5	9.1	189.0	29.7	6.2	8.4	200.0
SW10	30.0	7.3	49.4	268.0	29.5	6.9	46.6	266.0
SW11	32.4	6.5	37.5	197.0	30.0	7.6	29.4	182.0

ตารางที่ 4 ลักษณะทางเคมีและชีวภาพของแหล่งน้ำผิวดิน (N=22)

จุด	สิงหาคม					กันยายน				
	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	TCB (MPN/100ml)	FCB (MPN/100ml)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)	TCB (MPN/100ml)	FCB (MPN/100ml)
SW1	6.8±0.2	2.0±0.0	0.01±0.01	1,700±0.0	866±57.7	9.03±0.1	2.2±0.1	0.01±0.00	1,200±100.0	500±31.0
SW2	6.9±0.2	2.0±0.0	0.02±0.00	3,100±0.0	500±115.4	7.17±0.1	3.6±0.3	0.08±0.00	800±0.0	800±0.0
SW3	6.3±0.4	2.2±0.2	0.33±0.01	3,350±70.7	3,350±70.7	7.00±0.0	2.0±0.0	0.31±0.00	3,333±57.7	2,300±0.0
SW4	6.8±0.2	2.0±0.1	0.34±0.03	24,000±0.0	3,300±0.0	5.80±0.1	2.7±0.4	0.08±0.01	4,700±173.2	2,200±100.0
SW5	7.1±0.1	2.1±0.1	0.14±0.00	2,300±0.0	1,333±57.7	6.93±0.4	2.9±0.1	0.01±0.00	1,600±173.2	1,166±115.7
SW6	7.7±0.2	2.0±0.0	0.01±0.00	3,233±115.4	900±0.0	7.17±0.2	2.9±0.1	0.02±0.00	1,677±0.0	900±0.0
SW7	7.3±0.5	2.0±0.0	0.03±0.00	3,033±305.5	866±57.7	7.33±0.4	2.0±0.2	0.04±0.00	7,300±519.6	966±57.7
SW8	7.2±0.2	2.0±0.0	0.01±0.00	2,266±57.7	500±0.0	7.10±0.1	3.1±0.3	0.01±0.00	533±57.7	533±57.7
SW9	7.0±0.1	2.1±0.1	0.01±0.00	24,000±0.0	2,300±0.0	6.17±0.2	2.1±0.1	0.02±0.00	4,800±173.2	4,800±173.2
SW10	8.0±0.2	2.1±0.1	0.01±0.00	24,000±0.0	2,300±0.0	8.20±0.5	2.1±0.1	0.01±0.00	3,333±57.7	3,333±57.74
SW11	7.3±0.3	2.0±0.2	0.01±0.00	2,100±346.4	900.00±0.0	7.33±0.4	2.0±0.2	0.02±0.00	4,800±19.2	966±57.7

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ปริมาณความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.0 – 3.6 mg/l อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน สำหรับแหล่ง

น้ำผิวดินประเภท 3 - 4 ซึ่งค่าความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ของน้ำต้องไม่เกินกว่า 4 mg/l ทั้งนี้ อ่างเก็บน้ำร่องก่อ (SW2) เป็นจุดที่มีการปนเปื้อน



สูงที่สุด โดยมีการปนเปื้อนเกือบสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ เนื่องจากเป็นแหล่งสำรองน้ำตามธรรมชาติ กรณีน้ำใช้ใหม่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีไม่เพียงพอ โดยตั้งอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงฟาร์มปศุสัตว์ และรับน้ำทิ้งจากกิจกรรมการเกษตร จึงมีโอกาสได้รับการปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้ ทั้งนี้ปริมาณความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งให้เห็นได้ว่าแหล่งน้ำผิวดินทั้งหมดยังมีปริมาณความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ยังไม่ถึงระดับเสื่อมโทรม จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำยังมีปริมาณสูง

ปริมาณแอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) ที่เจือปนในน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.01 – 0.34 mg/l เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินประเภท 2 โดยมีการปนเปื้อนไม่เกิน 0.5 mg/l แสดงว่าแหล่งน้ำผิวดินทั้งหมดยังไม่มีการปนเปื้อนจากมลพิษสูงในระดับที่เป็นพิษต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ โดยอ่างเก็บน้ำบริเวณ 70 ไร่ (SW3) มีค่าการปนเปื้อนสูงสุดคือ อ่างเก็บน้ำบริเวณ 70 ไร่ ซึ่งมีการปนเปื้อนแอมโมเนียถึง 0.3 mg/l ในทั้งสองเดือน โดยทั่วไปแอมโมเนียสามารถเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรทไนโตรเจนได้ ซึ่งแหล่งน้ำที่มีความสกปรกสูงและมีการปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องมักมีการปนเปื้อนจากของเสียหรือสิ่งสกปรกจากชุมชน หรือมีการชะล้าง [13] ซึ่งสอดคล้องกับบริบทของจุด SW3 ซึ่งเป็นพื้นที่รับน้ำทิ้งจากการบำบัดของโรงอาหารกลางของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี หากต้องการกำจัดไนโตรเจนในแหล่งน้ำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมคลอรีน การแลกเปลี่ยนประจุ และการเป่าอากาศ [14] เพื่อนำมาช่วยในการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำผิวดินแห่งนี้

ปริมาณการปนเปื้อนทั้งแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ทั้งหลายและแบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 533-24,000 MPN/100ml และ 500-24,000 MPN/100ml ตามลำดับ โดยมีคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินอยู่ในประเภท 2-4 การปนเปื้อนด้านชีวภาพของแหล่งน้ำผิวดินใหม่มหาวิทยาลัยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่กว้าง จุดที่มีการปนเปื้อนสูง ได้แก่ อ่างเก็บน้ำบริเวณ 70 ไร่ (SW3) หนองน้ำหน้าอาคารอเนกประสงค์ (SW4) หนองน้ำหน้าอาคาร EN 4 (SW5) สระน้ำอาคารคณะเกษตรศาสตร์ (SW9) และ สระน้ำอาคารสำนักวิทยบริการ (SW10) การปนเปื้อนนี้อาจเนื่องมาจากการได้รับการชะล้างสิ่งสกปรกจากการตกของฝนที่นำพาสิ่งสกปรกลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งมีการศึกษาความสัมพันธ์ของการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในแหล่งน้ำจำกัดกับการชะล้างหน้าดินของฝน พบว่าจำนวนของแบคทีเรียมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ ด้วยการชะล้างที่เกิดจากการที่ฝนตกถึงผิวดินและไหลไปตามผิวดินลงสู่ที่ต่ำ [15] แหล่งน้ำผิวดินเหล่านี้เป็นลักษณะบ่อดินที่ไม่มีการก่อสร้างผนังหรือกำแพงเพื่อป้องกันการชะล้างน้ำและหน้าดินจากบริเวณรอบแหล่งน้ำ จึงอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนขึ้นได้โดยง่าย ซึ่งคุณภาพน้ำทางเคมี ได้แก่ ปริมาณไนเตรทและฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย [16] จากผลการวิจัย ครั้งนี้ในจุดเก็บตัวอย่าง SW4 เป็นจุดที่มีปริมาณแอมโมเนียสูงที่สุดจากทุกจุดเก็บตัวอย่างในรอบสองเดือนอาจมีผลทำให้ค่าแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหลายมีค่ามากที่สุด โดยทั่วไปแหล่งน้ำผิวดินที่อนุรักษ์ไว้สำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำและการผลิตประปาขั้นพื้นฐานควรมีค่าบีโอดีเกินกว่า



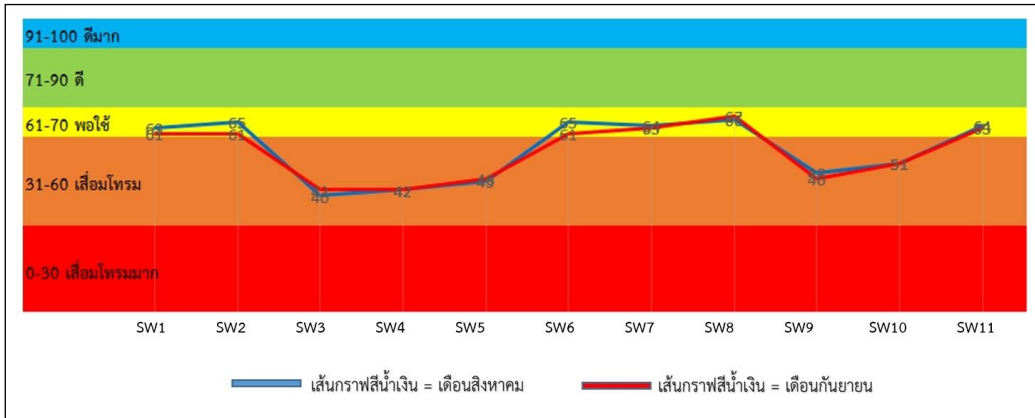
1.5 mg/l ถ้าจะอนุรักษ์ไว้เพื่อกิจกรรมด้านการเกษตร ไม่ควรมีค่าบีโอดีเกิน 2.0 mg/l ส่วนแหล่งน้ำที่จะอนุรักษ์ไว้ใช้ประโยชน์เพื่อกิจกรรมด้านการอุตสาหกรรมไม่ควรมีค่าบีโอดีเกินกว่า 4.0 mg/l [17]

ดังนั้น การนำน้ำจากแหล่งน้ำเหล่านี้มาใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคต้องมีการฆ่าเชื้อก่อนถูกนำไปใช้ประโยชน์ตามข้อกำหนดในประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 8 นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้พบว่า แหล่งน้ำผิวดิน อ่างเก็บน้ำหนองอีเจม (WS1) เป็นแหล่งน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีได้รับการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนก่อนสูบน้ำไปใช้น้ำอุปโภคบริโภคของนักศึกษาและบุคลากร

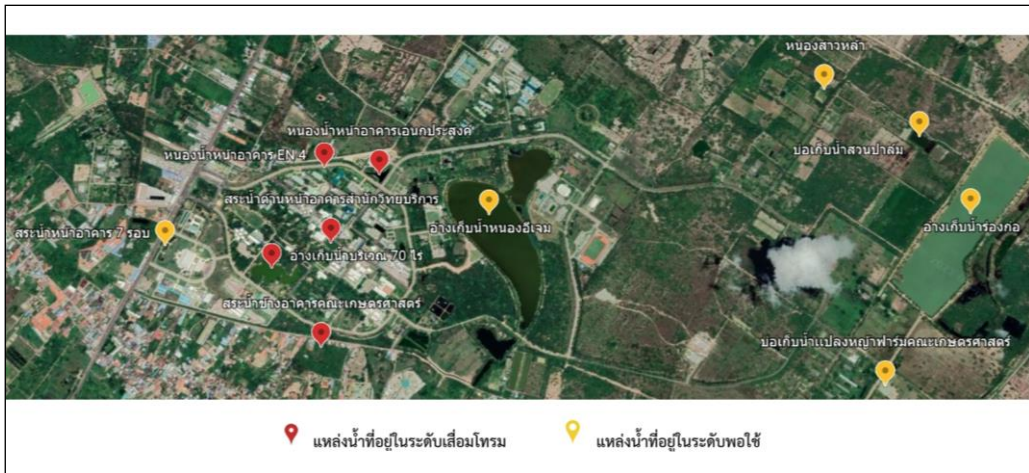
4.3 ดัชนีคุณภาพน้ำผิวดิน (WQI)

ดัชนีคุณภาพน้ำผิวดิน (WQI) ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีระหว่างเดือนสิงหาคม - กันยายน 2564 ด้วยระบบฐานข้อมูลคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ (IWIS) (คำนวณด้วยลักษณะทางเคมีและชีวภาพ จำนวน 5 พารามิเตอร์) พบว่า เดือนสิงหาคม มีค่าดัชนีคุณภาพน้ำ 41 - 66 คะแนน และเดือนกันยายนมีค่าดัชนีคุณภาพน้ำ 42 - 67 คะแนน ทั้งนี้ พบดัชนีคุณภาพน้ำมีค่าคะแนนลดลง 5 แห่ง ได้แก่ อ่างเก็บน้ำหนองอีเจม (SW1) อ่างเก็บน้ำร่องก่อ (SW2) อ่างเก็บน้ำบริเวณ 70 ไร่ (SW3) หนองสาวหล้า (SW6) และ สระน้ำอาคารคณะเกษตรศาสตร์ (SW9) (รูปที่ 3) โดยคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินส่วนใหญ่อยู่ในระดับพอใช้ จำนวน 6 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 54.55 เทียบได้กับแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3

มีความเหมาะสมกับการใช้ในการเกษตรและต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำตามปกติและฆ่าเชื้อโรคก่อนนำมาอุปโภคบริโภค และมีแหล่งน้ำที่คุณภาพอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม จำนวน 5 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 45.55 เทียบได้กับแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ซึ่งมีความเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรม ต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษและฆ่าเชื้อโรคก่อนนำมาอุปโภคบริโภค [18] ทั้งนี้ สภาพทั่วไปของแหล่งน้ำเหล่านี้มีอุณหภูมิและความขุ่นเป็นไปตามธรรมชาติของแหล่งน้ำนั้น ๆ ซึ่งอุณหภูมิของน้ำจะผันแปรตามอุณหภูมิของอากาศและลักษณะการใช้ประโยชน์ของที่ดิน ซึ่งอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ คือ 25-33 องศาเซลเซียส [19] และมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง แหล่งน้ำส่วนใหญ่ไม่มีปัญหาการปนเปื้อนทางเคมีในระดับที่สูงเกินกว่ามาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ได้แก่ ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD) และแอมโมเนีย (NH₃-N) ส่วนพารามิเตอร์ที่มีปัญหาการปนเปื้อนสูง คือ การปนเปื้อนแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหลาย (TCB) และแบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (FCB) เมื่อเทียบเคียงกับผลการศึกษาดัชนีคุณภาพน้ำกับแหล่งน้ำผิวดินแห่งอื่น ๆ เช่น คุณภาพน้ำในคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา จังหวัดนครนายก คุณภาพน้ำของแม่น้ำน่านตอนล่าง คุณภาพน้ำผิวดินรอบนิคมอุตสาหกรรมโรจนะ พบว่า ระดับคุณภาพน้ำส่วนใหญ่ของจุดเก็บตัวอย่างอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันกับผลการศึกษาในครั้งนี้ คือ ดัชนีคุณภาพน้ำอยู่ในระดับพอใช้และอยู่ในระดับเสื่อมโทรมเป็นส่วนน้อย [20-22]



รูปที่ 3 ดัชนีคุณภาพน้ำระหว่าง ส.ค.-ก.ย. 2564



รูปที่ 4 ผลการติดตามคุณภาพน้ำผิวดินระหว่าง ส.ค.-ก.ย. 2564

เมื่อพิจารณาคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินจากดัชนีคุณภาพน้ำ โดยนำมากำหนดบนแผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำ (รูปที่ 4) พบว่า แหล่งน้ำที่มีคุณภาพอยู่ในระดับเสื่อมโทรมทั้ง 5 แห่ง ได้แก่ WS3, WS4, WS5, WS9 และ WS10 มีที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่การศึกษาและสถานที่พักอาศัย ซึ่งมีจำนวนประชากรมากกว่าหนึ่งหมื่นคนเข้ามาใช้ประโยชน์ในสถานศึกษาในแต่ละวัน จึงอาจส่งผลให้เกิดปริมาณน้ำเสียและน้ำทิ้ง

ที่ถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำผิวดินต่าง ๆ ทำให้คุณภาพน้ำในภาพรวมลดต่ำกว่าในเขตพื้นที่เกษตรที่ไม่มีผู้คนเข้าไปใช้ประโยชน์ในจำนวนมาก นอกจากนี้ ดัชนีคุณภาพน้ำระหว่างแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานียังมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($F = 171.368$; $P\text{-value} < 0.01$)



สำหรับด้านการนำน้ำผิวดินไปใช้ประโยชน์พบว่า แหล่งน้ำผิวดิน จำนวน 5 แห่ง ซึ่งเป็นแหล่งน้ำผิวดินประเภท 4 ได้มีการนำน้ำไปใช้ประโยชน์โดยไม่สอดคล้องกับประเภทของแหล่งน้ำผิวดินเนื่องจากแหล่งน้ำเหล่านี้ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทจนทำให้น้ำมีคุณภาพเสื่อมโทรม ไม่ควรนำน้ำไปใช้ประโยชน์ในการรดน้ำต้นไม้หรือทำการเกษตร เนื่องจากอาจมีความสกปรกที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช หากต้องการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตรควรมีการปรับปรุงคุณภาพของแหล่งน้ำให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น (ประเภทที่ 3 เป็นอย่างน้อย) แอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับดัชนีคุณภาพน้ำอย่าง

มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($R^2 = 0.581$, $R^2_{\text{Adj}} = 0.449$, P-value = 0.01) (ตารางที่ 5) ดังนั้นการวางแผนเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดินของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จึงควรให้ความสำคัญต่อการลดไนโตรเจนในแหล่งน้ำเป็นลำดับแรก การกำจัดไนโตรเจนมีทั้งแบบใช้กระบวนการทางเคมีและแบบใช้กระบวนการทางชีวภาพ โดยวิธีการทางชีวภาพนั้นจะมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนแอมโมเนียในโตรเจนให้เป็นไนเตรตในสภาวะแบบใช้ออกซิเจนด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และขั้นตอนการเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจนกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) [17]

ตารางที่ 5 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับดัชนีคุณภาพน้ำผิวดินของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (N=22)

Parameter	b	S.E.	B	t	p-value
DO	3.1335	2.570	0.218	1.22	0.240
BOD	-1.472	3.652	-0.069	-.040	0.692
$\text{NH}_3\text{-N}$	-52.219	19.757	-0.595	-2.62	0.018*
TCB	-0.0004	0.0005	-0.281	-0.83	0.418
FCB	-0.0001	0.0004	-0.102	1.88	0.769

Constant = 42.2766, $R^2=0.581$, $R^2_{\text{Adj}} = 0.449$, P-value = 0.01

หมายเหตุ * หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติ

5. สรุปผลการศึกษา

คุณภาพแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จำนวน 11 แหล่ง ในช่วง 2 เดือนสิงหาคม – เดือนกันยายน 2564 พบว่า ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ (WQI) อยู่ระหว่าง 40-67 คะแนน แบ่งเป็นคุณภาพระดับพอใช้หรือแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3

จำนวน 6 แหล่ง (ร้อยละ 54.55) และแหล่งน้ำระดับเสื่อมโทรมหรือแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 จำนวน 5 แหล่ง (ร้อยละ 45.45) โดยแอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับดัชนีคุณภาพน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



6. ข้อเสนอแนะ

1. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีควรมีการพัฒนา กลไกการติดตามคุณภาพน้ำผิวดินอย่างสม่ำเสมอและ มีการนำน้ำผิวดินไปใช้ประโยชน์ให้เหมาะสมกับ คุณภาพและประเภทของแหล่งน้ำผิวดินในแต่ละแห่ง เนื่องจากการติดตามคุณภาพน้ำโดยใช้ดัชนีคุณภาพ น้ำใช้การวิเคราะห์เพียง 5 พารามิเตอร์

2. ควรมีการศึกษาแนวทางการบำบัดน้ำเสีย เบื้องต้นในพื้นที่บริการทางการศึกษาเนื่องจากเป็น เขตที่น้ำผิวดินมีคุณภาพเสื่อมโทรม โดยเฉพาะ แอมโมเนีย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Lartdavong, T. Chuenbaan, W. Chanthasin and S. Chuenbaan, Wastewater Treatment from Swine Farm and Nutritive Values of Water Lettuce (*Pistia stratiotes* L.), Rattanakosin Journal of Science and Technology, 2021, 3(2), 19-27. (in Thai)
- [2] https://www.pcd.go.th/pcd_news/19636/. (Accessed on 31 March 2022). (in Thai)
- [3] M. Muyotha, and S. Sangkaew, Assessment of water quality in water resources in the northeastern region of Thailand with a multi-criteria decision-making method, Thesis, Khon Kaen University, Thailand. 2014.
- [4] <http://iwis.pcd.go.th/index.php?method=calculate&etc=1648629260353> (Accessed on 31 March 2022). (in Thai)
- [5] P. Debels, R. Figueroa, R. Urrutia, R. Barra and X. Niell, Evaluation of water quality in the Chillán river (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index, Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 110(1), 301-322.
- [6] A. Lumb, T.C. Sharma and J.F. Bibeault, A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions, Water Quality, Exposure and Health, 2011, 3(1), 11-24.
- [7] M.R. Mohebbi, R. Saeedi, A. Montazeri, K.A. Vaghefi, S. Labbafi, S. Oktaie, M. Abtahi and A. Mohagheghian, Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified drinking water quality index (DWQI), Ecological Indicators, 2013, 30, 28-34.
- [8] A.D. Sutadian, N. Muttill, A.G. Yilmaz and B.J.C. Perera, Development of river water quality indices-a review, Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(58), 1-29.
- [9] <https://www.ubu.ac.th/web/academic/content/>. (Accessed on 31 March 2022). (in Thai)
- [10] Office of Physical and Environmental Management, Green University Performance 2021, Ubon Ratchathani University, Thailand, 2021. (in Thai)
- [11] <https://www.pcd.go.th/publication/12187>. (Accessed on 30 March 2022). (in Thai)



- [12] Department of Industrial Works, Handbook of standards for testing analytical methods for water pollution, 3rd Ed., Department of Industrial Works, Bangkok, Thailand, 2017. (in Thai)
- [13] <https://www.pcd.go.th/faqs>. (Accessed on 31 March 2022) (in Thai)
- [14] P. Nuphan and R. Chaichana, Effects of Nitrogen and Phosphorus on Eutrophication in Water Bodies and Nitrogen and Phosphorus Removal, Kasetsart Engineering Journal, 2014, 27(88), 57-67. (in Thai)
- [15] Department of Health, Manual on environmental health standards (air, water, soil, sound, vibration, heat and light intensity), Office of the Printing Affairs of the Veterans Organization, Bangkok, Thailand, 2009. (in Thai)
- [16] S. Wingwon and K. Hrimpeng, Relationship between water quality and total coliform bacteria in Pra-sae Estuary, Klaeng District, Rayong Province, Thailand, The 14th Graduate Research Conferences, Proceeding, 2014, 725-733.
- [17] http://reo06.mnre.go.th/newweb/index.php/2011-07-27-08-44-12/2011-08-04-07-38-%2041/2011-08-04-08-02-46/730-2013-04-11-03-45-18?fbclid=IwAR05fjWOPoxW-Rge7_7uWGlb-DbyWQ2vSnX-TcqixYSF0G0ogeK9ZmsCrlc. (Accessed on 18 May 2022) (in Thai)
- [18] S. Chuin, Water quality management Klong Wat Rajathiwas, Dusit, Bangkok by water replacement, Thesis, Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok, Thailand, 2014. (in Thai)
- [19] Y. Polamesanaporn, A study of water quality and varieties of protozoa species in the Chao Phraya River at Nonthaburi Province, SDU Research Journal Science and Technology, 3(1), 2010, 21-33. (in Thai)
- [20] A. Prachanurak and P. Prachanurak, Water quality assessment of right main canal in Nakhon Nayok Province, SWU Engineering Journal, 14(2), 2019, 98-109. (in Thai)
- [21] P. Pitakwinai, W. Khanitchaidecha, K. Ratananikom and A. Nakaruk, Statistical analysis of water quality parameters in downstream of Nan river, Thailand, Naresuan University Engineering Journal, 14(2), 2019, 14-23. (in Thai)
- [22] A. Sa-ngiamjai, Surface water quality around the Rojana Industrial Park, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province, The Journal of Industrial Technology, 15(1), 2019, 17-27. (in Thai)



การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซร่วมกับแบบจำลองคาโนเพื่อ การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักสาน

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2*} ชาตรี หอมเขียว^{1,2} ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร¹ และ พีรพงษ์ พันธะศรี³

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ สาขาออกแบบ, คณะศิลปกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 มกราคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 23 มิถุนายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 16 กันยายน 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักสานโดยการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซร่วมกับแบบจำลองคาโนเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวในจังหวัดสงขลา งานวิจัยนี้เริ่มจากการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซในการสำรวจและคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกหรือค่าคั่นเซของลูกค้ำที่มีต่อผลิตภัณฑ์ จากนั้นประยุกต์ใช้แบบจำลองคาโนในการสร้างแบบสอบถามเพื่อสำรวจและวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความพึงพอใจและความไม่พึงพอใจของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์โดยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์สามารถนำมาเป็นองค์ประกอบในการออกแบบผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซเพื่อสำรวจอารมณ์ความรู้สึก และความต้องการของลูกค้ำทั้งด้านความรู้สึกและด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีต่อภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์สำหรับนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ ซึ่งแบบสอบถามที่ใช้ในการสำรวจข้อมูลเป็นแบบลิเคิร์ต ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบสอบถาม 3 ส่วนหลักคือ ส่วนค่าแสดงขอบเขตความรู้สึก ส่วนขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณที่อยู่ในรูปแบบของสมการพยากรณ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์กระจุกจักที่ได้ออกแบบใหม่นั้นถูกวิเคราะห์ด้วยกระบวนการของเทคนิควิศวกรรมคั่นเซร่วมกับแบบจำลองคาโน ผลการวิจัย พบว่ามีค่าแสดงความรู้สึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟกระจุกจักสานหลัก ๆ คือ น่าสนใจ แปลกใหม่ และมีเอกลักษณ์ ทั้งพบว่าข้อกำหนดและคุณลักษณะสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักสานประกอบด้วย รูปทรงโคมไฟ รูปทรงฐานโคมไฟ ลวดลายการสาน โทนมสี และเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ มีความสอดคล้องกับอารมณ์ ความรู้สึก และความต้องการของลูกค้ำได้มากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การออกแบบผลิตภัณฑ์; วิศวกรรมคั่นเซ; แบบจำลองคาโน; กระจุกจัก; ผลิตภัณฑ์โคมไฟ

Application of Kansei Engineering Technique and Kano Model for Design and Development of Lamp Products from Krajoed Basketry

Surasit Rawangwong^{1,2*}, Chatree Homkhiew^{1,2}, Chainarong Srivabut¹ and Pheeraphong Phanthasri³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

³ Department of Design, Faculty of Fine Arts, Songkhla Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

Received: 3 January 2022; Revised: 23 June 2022; Accepted: 16 September 2022

Online Published: 21 December 2022

Abstract: This research aimed to design and develop a decorative type of Krajoed woven lantern by applying Kansei engineering (KE) and Kano's model to promote tourism in the Songkhla Province. The Kansei Engineering (KE) was used to survey and select the customer's feelings or Kansei words for the product and the Kano model was then applied to create a questionnaire to survey and analyze the coefficients of satisfaction and dissatisfaction of product attributes, where qualified product attributes could be used as a component of product design. Applying KE to explore the emotions, feelings and needs of customers, was used to evaluate the product attributes towards designing new products. The data used to create the questionnaire consisted of 3 main parts, namely the word boundary part, product feature scope, and product representative images. The survey data were then analyzed with a quantitative analysis method in the form of a forecast equation. The newly designed Krajoed products were analyzed from KE and Kano model. The results showed that the main expressions for the design of Krajoed lamp products are interesting, exotic, and unique. Also, the product features were designed in the shape of the lamp, weave pattern, color tone, and product identity. There are in tune with the moods feelings and needs of the customers even more.

Keywords: Product Design; Kansei Engineering; Kano Model; Krajoed; Lamp Products



1. บทนำ

ศิลปวัฒนธรรมและภูมิปัญญาท้องถิ่นได้รับการส่งเสริมต่อยอด สืบทอด และพัฒนามาเป็นเวลายาวนานพร้อม ๆ กับการตั้งถิ่นฐานของชาวไทยซึ่งปรากฏให้เห็นได้ในรูปของมรดกทางวัฒนธรรมทั้งที่เป็นจิตวิญญาณและผลงานที่สามารถมองเห็นได้โดยส่วนหนึ่งของมรดกทางวัฒนธรรมและภูมิปัญญาที่เป็นรูปธรรมเหล่านั้นเป็นกระจกสะท้อนให้เห็นวิถีชีวิตชาวบ้านในแต่ละยุคละสมัย [1] จังหวัดสงขลา พัทลุง และนครศรีธรรมราช เป็นจังหวัดในภาคใต้ที่มีพื้นที่เพาะปลูกพืชไร่ พืชสวนที่หลากหลายและจำนวนมาก การยึดอาชีพส่วนใหญ่จึงเป็นเกษตรกร นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งภูมิปัญญาท้องถิ่นเกี่ยวกับกรรมวิธีการผลิตหรือการประกอบอาชีพทางด้านหัตถกรรมที่มีลักษณะมุ่งเน้นการผลิตเพื่อพึ่งพาตนเอง ผลิตภัณฑ์กระจูดเป็นเอกลักษณ์หนึ่งของจังหวัดพัทลุง และสงขลา เนื่องจากมีทุ่งกระจูดเป็นจำนวนมากและคนในชุมชนได้อาศัยการเก็บต้นกระจูดมาจากสานเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ค่อยตอบสนองความต้องการของลูกค้า ในขณะที่ตลาดยังมีความต้องการในตัวผลิตภัณฑ์ที่ทำจากกระจูด เพราะต้องการความเป็นเอกลักษณ์และสวยงามของวัสดุ ก่อให้เกิดคุณค่าทางความรู้สึกและทางจิตใจแก่ผู้บริโภค และมีรูปแบบผลิตภัณฑ์สามารถดึงดูดให้ผู้บริโภคตัดสินใจเลือกซื้อได้ง่าย แต่ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ก็ต้องตอบสนองด้านประโยชน์ใช้สอยและความงามในตัวผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย [2]

จากการที่คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่ของกลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์กระจูด พบว่ากลุ่มผู้ผลิตดังกล่าวยังขาดการเชื่อมโยงกับความรู้ทางด้าน การออกแบบ



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์จากกระจูด

ผลิตภัณฑ์กระจูดแบบใหม่ ๆ โดยทั่วไปกลุ่มผู้ผลิตกระจูดยังขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบเดิม ๆ เพื่อส่งขายตลาดเป้าหมาย ซึ่งขาดความหลากหลายของผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ ๆ และขาดการศึกษาวิจัยข้อมูลความต้องการของตลาดหรือผู้บริโภค โดยทั่วไปกลุ่มผู้ผลิตจะมีความสามารถในการขึ้นรูป แต่ยังมีข้อด้อยเกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า เนื่องจากผลิตภัณฑ์กระจูดเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทจักสานที่เป็นงานหัตถกรรมหรือขึ้นรูปด้วยมือเป็นส่วนใหญ่ จึงมีข้อจำกัดในการออกแบบและการขึ้นรูป [3]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering) ร่วมกับแบบจำลองคานอ (Kano's Model) เพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจูดจักสานประเภทของประดับตกแต่ง อีกทั้งยังเป็นของที่ระลึกสำหรับนักท่องเที่ยวเพื่อเป็นการส่งเสริมการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์จากกระจูด มีมาตรฐานในการออกแบบและการขึ้นรูป การนำทรัพย์สินภูมิปัญญาในท้องถิ่นมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ มีจุดเด่นและมีมูลค่าเพิ่มเป็นที่ต้องการของตลาด [4] และยิ่งส่งผลให้กลุ่มผู้ผลิตสามารถนำความรู้ไปขยายผล เพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของกลุ่มผู้ผลิตรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป



2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 วิศวกรรมคันทเซ (Kansei Engineering)

วิศวกรรมคันทเซ หรือการออกแบบเกี่ยวกับอารมณ์ (Emotional Design, Affective Engineering) ได้รับการพัฒนาโดย Prof. Dr. Mitsuho Nagamachi ชาวญี่ปุ่น ในปี ค.ศ. 1970 สมัยนั้นเรียกว่า วิศวกรรมอารมณ์ [5] วิศวกรรมคันทเซ เป็นเทคนิคเชิงวิศวกรรมในการรวบรวมความต้องการเชิงอารมณ์ ความรู้สึกของผู้บริโภค และกำหนดเป็นต้นแบบการพยากรณ์เชิงคณิตศาสตร์ของความต้องการเชิงอารมณ์ที่มีผลต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ [6] ช่วยแปลงความต้องการของผู้บริโภค ที่เป็นเชิงคุณภาพให้อยู่ในรูปปริมาณ วิศวกรรมคันทเซไม่เพียงแต่ช่วยในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้บริโภคกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ยังสามารถหารายละเอียดของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้ [7] กระบวนการของวิศวกรรมคันทเซ ปัจจุบันได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย นักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาและบูรณาการกับวิธีการต่าง ๆ เข้ากับแนวความคิดวิศวกรรมคันทเซครอบคลุมและแก้ไข ปัญหาในหลาย ๆ ด้าน [8] เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิก ประเภทของที่ระลึก [9] การศึกษาวิศวกรรมคันทเซตำแหน่งคันทโยกเบาะรถยนต์ [10] และการพัฒนาระบบการออกแบบรูปแบบการตกแต่งรถยนต์ [11] ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานของเทคนิควิศวกรรมคันทเซ ดังต่อไปนี้ [12]

(1) การเลือกขอบเขต (Choice of Domain) คือการเลือกกลุ่มตลาดหรือผลิตภัณฑ์ วิศวกรรมคันทเซจะเริ่มจากการตัดสินใจในด้านการสร้างหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีลักษณะเฉพาะ

(2) การกำหนดค่าความรู้สึก (Span the Semantic Space) ทำการรวบรวมค่าแสดงความรู้สึกหรือเรียกอีกชื่อว่าคันทเซ (Kansei Word) เพื่อใช้เชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

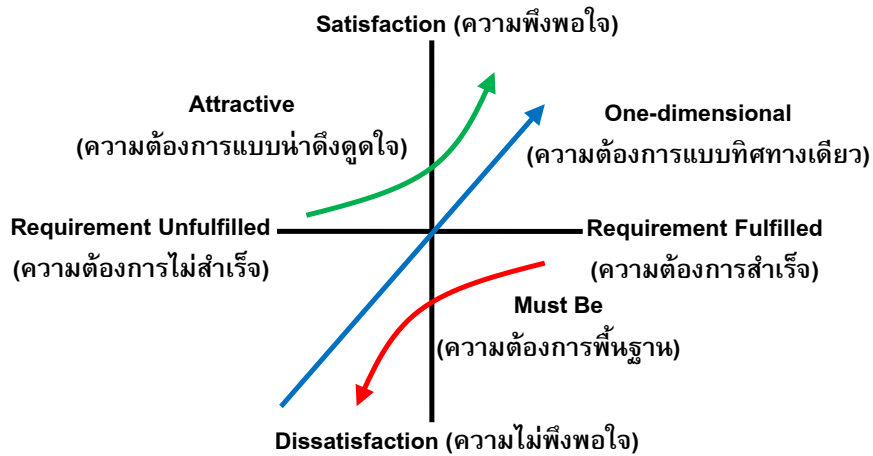
(3) การกำหนดค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Span the Space of Properties) จะระบุเป็นเชิงกายภาพให้ตรงกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้นสามารถทำคู่ขนานกับรอบด้านความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์

(4) การสังเคราะห์ (Synthesis) จะเชื่อมโยงกันระหว่างค่าแสดงความรู้สึกและค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยส่วนใหญ่จะใช้แบบสอบถามเพื่อทำการประมวลผลทางสถิติและวิเคราะห์เชิงปริมาณ

(5) การตรวจสอบความถูกต้องและการสร้างแบบจำลอง (Test of Validity and Model Building) โดยนำผลที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้อง ทำการสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์แปลงเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ

2.2 แบบจำลองคานโน (Kano's Model)

แบบจำลองคานโน สร้างขึ้นโดย Prof. Dr. Noriaki Kano ในปี ค.ศ. 1984 ผู้ชำนาญการทางด้านคุณภาพชาวญี่ปุ่น [13] แสดงดังรูปที่ 2 เป็นการออกแบบคุณลักษณะทางเทคนิคที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้เกิดความพึงพอใจนั้นจำเป็นต้องมีวิธีในการระบุความต้องการของลูกค้าให้ชัดเจนขึ้น จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการจัดกลุ่มความต้องการของลูกค้า [14] ทั้งนี้ความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2 แบบจำลองคานโน (Kano's Model) [15]

ในรูปแบบที่แตกต่างกันได้ 3 ประเภท ซึ่งจะระบุคุณสมบัติของสินค้าที่มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าในรูปแบบที่แตกต่างกันไปดังนี้

(1) สิ่งที่ทำให้ลูกค้าเกิดความไม่พึงพอใจ (Must-Be Requirement) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพขั้นพื้นฐานที่ลูกค้าคาดหวังที่จะพบในผลิตภัณฑ์ หากในผลิตภัณฑ์ไม่มีคุณลักษณะดังกล่าว ลูกค้าจะเกิดความไม่พอใจ

(2) สิ่งที่ทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจ (One-Dimensional Requirement) เป็นสิ่งที่ลูกค้าต้องการให้มีในผลิตภัณฑ์ ถ้าคุณลักษณะเหล่านี้มีมากขึ้นเท่าไรลูกค้าจะมีความพึงพอใจมากขึ้นเท่านั้น หรือมีลักษณะที่แปรผันตรงกับความพึงพอใจของลูกค้า

(3) สิ่งที่ทำให้ลูกค้ารู้สึกเบิกบาน (Attractive Requirement) เป็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ หรือคุณลักษณะทำให้ลูกค้ามีความสนใจผลิตภัณฑ์มากขึ้น และทำให้ลูกค้ายินดีด้วยความประหลาดใจ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมค้นหาร่วมกับแบบจำลองคานโนเพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์คอมพิวเตอร์จากกระจุจกสถานสำหรับระดับตกแต่ง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 การเลือกขอบเขต (Choice of Domain)

ผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาคือ ผลิตภัณฑ์คอมพิวเตอร์จากกระจุจกสถานสำหรับระดับตกแต่ง เนื่องจากเป็นที่ต้องการของผู้ผลิต และความต้องการของตลาดเป้าหมาย โดยมีขอบเขตของกลุ่มเป้าหมายเป็นกลุ่มโรงแรม รีสอร์ท กลุ่มนักท่องเที่ยวที่เดินทางเข้ามาท่องเที่ยวในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา กลุ่มผู้ผลิตและกลุ่มผู้ใช้หรือตัวแทนจำหน่ายผลิตภัณฑ์กระจุจก

3.2 การกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึ

ขั้นตอนนี้เป็นารคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกหรือคำค้นเซที่จะใช้เชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้



3.2.1 การรวบรวมค่าแสดงความรู้สึกรู้สึก

ขั้นตอนนี้จะดำเนินการรวบรวมค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจุกสถาน จำนวน 75 คำ ซึ่งเป็นคำคุณศัพท์แสดงอารมณ์เกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟของผู้ออกแบบ

3.2.2 การคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกรู้สึก

นำเอาค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่ได้จากการรวบรวมในขั้นตอนก่อนหน้าไปจัดทำแบบสอบถามที่ 1 เพื่อนำไปคัดกรองค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์โดยแบบสอบถามที่ใช้เป็นการหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence: IOC) แสดงดังสมการที่ 1 ซึ่งถูกคัดกรองจากนักออกแบบและผู้เชี่ยวชาญด้านผลิตภัณฑ์ และด้านวิศวกรรม จำนวนทั้งหมด 25 ท่าน

$$IOC = \frac{\sum R}{N} \quad (1)$$

เมื่อ IOC คือค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างคำถามกับจุดประสงค์ $\sum R$ คือผลรวมคะแนนพิจารณาจากผู้เชี่ยวชาญ และ N คือจำนวนผู้เชี่ยวชาญ

ซึ่งหลักการคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกจะตัดสินใจจากค่า IOC ที่มีค่ามากกว่า 0.5 เพราะสามารถแสดงถึงความเที่ยงตรงและยอมรับได้ และจะทำการปฏิเสธค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่มีค่า IOC น้อยกว่า 0.5 เพราะเป็นค่าที่ต้องมีการปรับปรุงหรือไม่ยอมรับ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 เพราะเป็นค่าที่แสดงถึงความเที่ยงตรงและยอมรับได้ตามหลักเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย [16]

3.2.3 การแปลความหมาย

นำผลการคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่ผ่านการคัดเลือกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 ไปคัดกรองกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่สามารถสื่อถึงผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุดและเหมาะสมที่สุด

3.3 การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Span the Space of Properties)

เป็นการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจุกสถาน มาสร้างแบบสอบถามที่ 2 โดยในขั้นตอนนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองคาโนในการจัดทำแบบสอบถาม ซึ่งเป็นการจัดลำดับความสำคัญของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือก คือ คัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีการจำแนกประเด็นในหมวด M, O และ A ตามกฎ $M > O > A > I$ ซึ่งกฎการประเมิน $M > O > A > I$ เป็นการประเมินในกรณีความต้องการที่ผลิตภัณฑ์ได้ผลลัพธ์ที่ตัดสินใจยากหรือไม่ชัดเจน การประยุกต์ใช้กฎในการประเมิน $M > O > A > I$ นับว่ามีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากความต้องการแรกที่ต้องดำเนินการปรับปรุงหรือทำให้กับผลิตภัณฑ์ คือ ส่วนแรกที่รุนแรงต่อความรู้สึกมากที่สุดคือ M หมายถึงคุณลักษณะนี้จำเป็นต้องมีสำหรับผลิตภัณฑ์ สาเหตุเนื่องจากเพื่อป้องกันความไม่พึงพอใจที่จะมีต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งนับว่าสำคัญที่สุด และต้องรีบทำการปรับปรุง O หมายถึง ความต้องการแบบทิศทางเดียว โดยถ้าเพิ่มคุณลักษณะในหมวดนี้จะทำให้ระดับความพึงพอใจเพิ่มมากขึ้น A หมายถึง คุณลักษณะที่ลูกค้าไม่ได้คาดหวังไว้ โดยถ้ามีคุณลักษณะในหมวดนี้จะทำให้ลูกค้าสนใจผลิตภัณฑ์มากขึ้น แต่ถ้าไม่พบ



คุณลักษณะหมวดนี้ ก็รู้สึกเฉย และ I หมายถึง คุณลักษณะที่มีอยู่หรือไม่มีก็ได้ส่งผลให้ลูกค้าพึงพอใจหรือไม่พึงพอใจ [17]

3.4 การรวบรวมภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ (Collection of Product Representative Images)

ขั้นตอนนี้เป็นกรรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มีความแตกต่างและหลากหลาย โดยทำการรวบรวมจากสื่ออินเทอร์เน็ต นิตยสาร และสิ่งที่กำลังเป็นที่นิยม จากนั้นประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) สำหรับแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามจำนวนผลการวิเคราะห์ขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก เพื่อคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ได้ง่ายมากขึ้น โดยเกณฑ์การคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์คือ คัดเลือกเลือกภาพผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยตรงกับผลการวิเคราะห์ขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยมากที่สุด เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในประเมินแบบสอบถามที่ 3

3.5 การสร้างแบบสอบถามและสำรวจความคิดเห็นเพื่อทำการประเมินผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนนี้เป็นกรสร้างแบบสอบถามที่ 3 ที่มีองค์ประกอบของแบบสอบถาม 3 ส่วน คือ คำค้นเซตที่แสดงขอบเขตความรู้สึก คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงขอบเขตคุณลักษณะและภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นข้อมูลผลการวิจัยในขั้นตอนก่อนหน้า จากนั้นเก็บข้อมูลจากกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย โดยเจาะจงกลุ่มเป้าหมายที่เป็นผู้บริโภคหลัก ๆ ประกอบด้วย กลุ่มโรงแรม รีสอร์ท ตัวแทนจำหน่ายผลิตภัณฑ์ กระจุต และกลุ่มนักท่องเที่ยวที่เดินทางมาท่องเที่ยวในพื้นที่ลุ่มน้ำ

ทะเลสาบสงขลา จำนวน 37 คน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลต่ออารมณ์ความรู้สึกของคำค้นเซตต่าง ๆ จากนั้นดำเนินการสรุปข้อมูลจากแบบสอบถามที่ 3 โดยแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิและนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ

3.6 การประเมินผลจากแบบสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล

การนำเสนอผลจากแบบสอบถามที่ 3 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มคือ วิธีการวิเคราะห์ด้วยมือ วิธีการทางสถิติ และวิธีอื่น ๆ เช่น Neural Network [18] พบว่า วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมาก คือ วิธีการทางสถิติ โดยเครื่องมือทางสถิติที่ประยุกต์ใช้ คือ ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type I: QT1) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 รวบรวมผลจากการสำรวจกลุ่มเป้าหมายเบื้องต้น

นำส่วนของระดับคะแนนในแต่ละคำแสดงความรู้สึกของภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์แต่ละภาพมาหาค่าเฉลี่ยทำการดูแนวโน้มของข้อมูลว่าคำแสดงความรู้สึกที่มีความสัมพันธ์ต่อภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์

3.6.2 วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง

นำส่วนของข้อมูลจากแบบสอบถามมาวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้ค่า R-Square หรือค่า



สัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง (Square Multiple Correlation Coefficient: MCC^2) โดยทั่วไปค่า MCC^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง +1.00 สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า MCC^2 มากกว่า 0.5 จึงจะยอมรับผล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pimapunsri [6] ที่มีการกำหนดค่า MCC^2 มากกว่า 0.5

3.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก

หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (Partial Correlation Coefficient: PCC) ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มาก โดยมีระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05

3.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย

หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย จากนั้นพิจารณาค่า CS (Category Score) ที่มีความสัมพันธ์มากและมีระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05 เพื่อเป็นข้อกำหนดและแนวทางในการช่วยทีมนักออกแบบมีข้อมูลในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการ อารมณ์ และความรู้สึ

3.7 การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

นำเอาข้อมูลมาสรุปเป็นข้อกำหนดและตรวจสอบความถูกต้องจากนั้นส่งให้ทีมนักออกแบบ โดยการให้ความหมายของความรู้สึที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ แปลงเป็นองค์ประกอบของการออกแบบ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุดจักษ์สถาน จากนั้นทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และทำการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์

4. ผลการวิจัย

ผลจากการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมค้นเซร่วมกับแบบจำลองคาโน สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุดจักษ์สถานประเภทของระดับตกแต่งตามวิธีการดังกล่าวข้างต้นสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึ

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าแสดงความรู้สึต่อผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุดจักษ์สถาน โดยมีคำถามจากแบบสอบถามที่ 1 ว่าในการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุดจักษ์สถาน ท่านคิดว่าค่าแสดงความรู้สึเหล่านี้สามารถสื่อถึงผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุดจักษ์สถานได้หรือไม่ จำนวนทั้งสิ้น 75 คำ โดยจากการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ วิศวกรรมการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และการตลาด จำนวนทั้งหมด 25 ท่าน ซึ่งผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่เป็นเพศชาย 64% ระดับการศึกษา ระดับปริญญาโท 56% และเป็นอาจารย์/นักวิชาการ 72% พบว่า มีคำค้นเซที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์ (IOC>0.5) จำนวน 32 คำ เนื่องจากคำค้นเซจำนวนมากเกินไป และไม่สื่อถึงผลิตภัณฑ์ จึงได้นำเอาคำ ค้นเซที่ได้ไปคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการออกแบบและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ จำนวน 5 ท่าน อีกครั้งเพื่อหาคำค้นเซที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้น คำค้นเซที่ถูกคัดเลือกขั้นสุดท้ายมีจำนวน 9 คำ ดังตารางที่ 1

4.2 ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

จากการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์และเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 2 พร้อมทั้งวิเคราะห์หาตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ พบว่า มีผลการ



วิเคราะห์หาตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งจากตาราง มีค่า R และ Q ที่ไม่ได้กล่าวมาข้างต้น R คือ คุณลักษณะนอกจากที่ไม่ต้องการแล้วควรมีการปรับปรุง และ Q คือ คุณลักษณะที่จำเป็นต้องตระหนักให้มากเพราะอยู่ในส่วนที่ไม่พอใจจากนั้น ดำเนินการคัดเลือกประเด็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีการจำแนกประเด็นคุณลักษณะที่อยู่ในหมวด M, O และ A ตามกฎ $M > O > A > I$ พบว่า มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุดจักสานประเภทของระดับตกแต่งที่อยู่ในหมวด M และ A จำนวน 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และ 13 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก จำนวน 9 คำ

ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก			
ค่าแสดงความรู้สึกผ่านเกณฑ์	IOC >0.5	ค่าแสดงความรู้สึกผ่านเกณฑ์	IOC >0.5
สวยงาม	0.92	ร่วมสมัย	0.60
แปลกใหม่	0.88	จุดเด่น	0.60
มีสไตล์	0.84	เรียบง่าย	0.60
เอกลักษณ์	0.84	มีรสนิยม	0.52
น่าสนใจ	0.76		

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์หาตัวแปรคุณลักษณะผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุดจักสาน

คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	A	O	M	I	R	Q	รวม	การจำแนก
Q1 รูปทรงของผลิตภัณฑ์	แบบเหลี่ยม, แบบกลม	20.69	6.90	51.72	20.69	0.00	0.00	100	M
Q2 รูปทรงหมวกโคมไฟ	แบบครึ่งวงกลม, แบบทรงกระบอก	62.07	13.79	8.62	15.52	0.00	0.00	100	A
Q3 รูปทรงฐานโคมไฟ	แบบทรงเรขาคณิต, แบบโค้งมน	43.10	10.34	15.52	31.03	0.00	0.00	100	A
Q4 โทนสีของผลิตภัณฑ์	โทนสีอ่อน, โทนสีทึบ	39.66	20.69	18.97	20.69	0.00	0.00	100	A
Q5 ขนาดของผลิตภัณฑ์	ขนาดเล็ก, ขนาดกลาง, ขนาดใหญ่	17.24	29.31	34.48	18.97	0.00	0.00	100	M
Q6 ความสูงของผลิตภัณฑ์	สูงปานกลาง, สูงมาก	13.79	8.62	18.97	58.62	0.00	0.00	100	I
Q7 ลวดลายของผลิตภัณฑ์	ลายท้องถิ่น, ลายธรรมชาติ	37.93	18.97	6.90	36.21	0.00	0.00	100	A
Q8 ความประณีตของผลิตภัณฑ์	ประณีตมาก, ประณีตปานกลาง	37.93	5.17	31.03	25.86	0.00	0.00	100	A
Q9 การตกแต่งเพิ่มเติม	เพิ่มเติมน้อย, เพิ่มเติมปานกลาง	24.14	6.90	29.31	39.66	0.00	0.00	100	I
Q10 เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์	เอกลักษณ์ไทย, เอกลักษณ์สากล	46.55	15.52	31.03	6.90	0.00	0.00	100	A
Q11 วัสดุเสริมในการตกแต่ง	เสริมด้วยไม้, เสริมด้วยเหล็ก	24.14	6.90	10.34	58.62	0.00	0.00	100	A
Q12 ความโปร่งของตัวหมวก	โปร่งใสมาก, โปร่งแสง	0.00	0.00	0.00	46.55	48.28	0.00	100	R
Q13 ความสว่าง	สว่างมาก, สว่างน้อย	10.34	1.72	58.62	29.31	0.00	0.00	100	M

**ตารางที่ 3** ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักสาน

คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	การจำแนก	ค่าความพึงพอใจ (SI)	ค่าความไม่พอใจ (DI)
Q1 รูปทรงของผลิตภัณฑ์	แบบเหลี่ยม, แบบกลม	M	0.28	-0.59
Q5 ขนาดของผลิตภัณฑ์	ขนาดเล็ก, ขนาดกลาง, ขนาดใหญ่	M	0.47	-0.69
Q13 ความสว่าง	สว่างมาก, สว่างน้อย	M	0.12	-0.60
Q4 โทนสีของผลิตภัณฑ์	โทนสีอ่อน, โทนสีทึบ	A	0.60	-0.40
Q7 ลวดลายของผลิตภัณฑ์	ลายท้องถิ่น, ลายธรรมชาติ	A	0.57	-0.26
Q8 ความประณีตของผลิตภัณฑ์	ประณีตมาก, ประณีตปานกลาง	A	0.43	-0.36
Q10 เอกลักษณะของผลิตภัณฑ์	เอกลักษณ์ไทย, เอกลักษณะสากล	A	0.62	-0.47
Q2 รูปทรงหมวกโคมไฟ	แบบครึ่งวงกลม, แบบทรงระบอบก	A	0.76	-0.22
Q3 รูปทรงฐานโคมไฟ	แบบทรงเรขาคณิต, แบบโค้งมน	A	0.53	-0.26

4.3 ผลการกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์

ผลการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ พบว่าภาพผลิตภัณฑ์โคมไฟจักสานที่มีคุณลักษณะหลากหลาย มีจำนวนทั้งหมด 38 ภาพ ทั้งนี้เมื่อประยุกต์ใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงในการแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์สำหรับเปรียบเทียบเพื่อคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติครอบคลุมถึงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่ผ่านการคัดเลือกมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบภาพผลิตภัณฑ์สามารถสรุปได้ว่าภาพผลิตภัณฑ์ที่สามารถครอบคลุมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยมากที่สุดมีจำนวนทั้งสิ้น 5 ภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1

จากการนำข้อมูลจากแบบสอบถามที่ 3 มาวิเคราะห์ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 หรือ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Linear Multiple Regression) โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ

(Multiple Correlation Coefficient: MCC^2) ระหว่างค่าแสดงความรู้สึก จำนวน 9 ค่า กับภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ภาพ แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักสาน มีคะแนนค่าเฉลี่ยสูงสุดของแต่ละภาพที่แตกต่างกัน และมีค่า MCC^2 มากกว่า 0.5 อยู่จำนวน 40 ค่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าคะแนนเฉลี่ยของค่าแสดงความรู้สึกสูงสุดที่ตรงกับค่า MCC^2 ที่มากกว่า 0.5 มีจำนวน 6 ค่า ที่ผ่านเกณฑ์ไปวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 เพื่อหาค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (PCC) และค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (CS) ที่มีค่าการวิเคราะห์เป็นค่าบวก ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($P\text{-Value} < 0.05$) เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์ย่อยใดมีครบทุกเงื่อนไขเพราะมีผลต่อความรู้สึกในทิศทางเดียวกันเพื่อให้เกิดข้อสรุปของผลการวิเคราะห์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สรุปผลได้แสดงดังตารางที่ 6



บทความวิจัย

1. รูปทรงโคมไฟ		2. รูปทรงหมวกโคมไฟ		
แบบกลม	แบบเหลี่ยม	ครึ่งวงกลม	ทรงกรวย	ทรงระบอก
ภาพที่ 1, 3, 4, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	ภาพที่ 2, 5, 7, 10, 17, 18, 21, 22, 35, 37, 38	ภาพที่ 1, 3, 9	ภาพที่ 2, 5, 7, 10, 12, 17, 18, 22, 26, 27, 35, 37, 38	ภาพที่ 8, 14, 15, 16, 19, 20, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 34

3. รูปทรงฐานวางโคมไฟ		4. โทนสี	
ทรงเรขาคณิต	โค้งมน	สีอ่อน	สีทึบ
ภาพที่ 1, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 31, 35, 36, 37, 38	ภาพที่ 8, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34	ภาพที่ 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 32, 33, 34, 35, 36	ภาพที่ 3, 7, 22, 28, 29, 30, 37, 38

5. ขนาดของโคมไฟ			6. ลวดลาย	
ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่	ลวดลายท้องถิ่น	ลวดลายธรรมชาติ
ภาพที่ 12, 22, 26, 36	ภาพที่ 3, 4, 5, 6, 7, 11, 15, 16, 19, 20, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 38	ภาพที่ 1, 2, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18, 23, 37	ภาพที่ 8, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 21, 22, 37	ภาพที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 19, 20, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 38

7. ความประณีต		8. เอกลักษณ์ของโคมไฟ	
มีความประณีตมาก	มีความประณีตปานกลาง	เอกลักษณ์ความเป็นไทย	เอกลักษณ์สากล
ภาพที่ 5, 6, 11, 12, 13, 21, 22, 33, 37	ภาพที่ 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 17, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 35, 36, 38	ภาพที่ 11, 13, 15, 16, 18, 21, 22	ภาพที่ 1, 5, 9, 14, 36

รูปที่ 3 แผนผังเชื่อมโยงในการแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์



ตารางที่ 4 ผลการกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์

ภาพที่	ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์	คุณลักษณะภาพตรงตาม คุณลักษณะย่อย	ภาพที่	ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์	คุณลักษณะภาพตรงตาม คุณลักษณะย่อย
1		<ol style="list-style-type: none"> รูปทรงแบบกลม รูปทรงหมวกโคมไฟครึ่งวงกลม รูปทรงฐานวางโคมไฟทรงเรขาคณิต โทนสีอ่อน ขนาดใหญ่ ลวดลายธรรมชาติ มีความประณีตปานกลาง เอกลักษณ์สากล 	4		<ol style="list-style-type: none"> รูปทรงแบบกลม รูปทรงหมวกโคมไฟทรงระบอก รูปทรงฐานวางโคมไฟทรงเรขาคณิต โทนสีอ่อน ขนาดใหญ่ ลวดลายธรรมชาติ มีความประณีตปานกลาง เอกลักษณ์สากล
2		<ol style="list-style-type: none"> รูปทรงแบบเหลี่ยม รูปทรงหมวกโคมไฟทรงกรวย รูปทรงฐานวางโคมไฟทรงเรขาคณิต โทนสีอ่อน ขนาดกลาง ลวดลายธรรมชาติ มีความประณีตมาก เอกลักษณ์สากล 	5		<ol style="list-style-type: none"> รูปทรงแบบเหลี่ยม รูปทรงหมวกโคมไฟทรงกรวย รูปทรงฐานวางโคมไฟทรงเรขาคณิต โทนสีทึบ ขนาดเล็ก ลวดลายท้องถิ่น มีความประณีตมาก เอกลักษณ์ความเป็นไทย
3		<ol style="list-style-type: none"> รูปทรงแบบกลม รูปทรงหมวกโคมไฟครึ่งวงกลม รูปทรงฐานวางโคมไฟทรงเรขาคณิต โทนสีอ่อน ขนาดใหญ่ ลวดลายธรรมชาติ มีความประณีตปานกลาง เอกลักษณ์สากล 			

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงพหุคูณกำลังสองของผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจูดจักสาน

ค่าแสดงความรู้สึกรู้สึก / ภาพ ผลิตภัณฑ์	ภาพที่ 1		ภาพที่ 2		ภาพที่ 3		ภาพที่ 4		ภาพที่ 5	
	ค่าเฉลี่ย	MCC ²	ค่าเฉลี่ย	MCC ²	ค่าเฉลี่ย	MCC ²	ค่าเฉลี่ย	MCC ²	ค่าเฉลี่ย	MCC ²
สวยงาม	2.54	0.80 ^{**}	3.89	0.86 ^{**}	4.63 [*]	0.31	3.97	0.59 ^{**}	2.29	0.73 ^{**}
แปลกใหม่	1.94	0.85 ^{**}	3.91 [*]	0.50 ^{**}	3.54	0.75 ^{**}	2.29	0.82 ^{**}	1.94	0.95 ^{**}
มีสไตล์	2.83	0.89 ^{**}	3.80	0.47	4.14 [*]	0.26	2.83	0.80 ^{**}	2.46	0.80 ^{**}
เอกลักษณ์	2.40	0.83 ^{**}	3.66	0.88 ^{**}	3.63 [*]	0.65 ^{**}	3.00	0.97 ^{**}	2.80	0.90 ^{**}
น่าสนใจ	2.26	0.76 ^{**}	3.77	0.26	4.31 [*]	0.62 ^{**}	3.09	0.92 ^{**}	2.34	0.76 ^{**}
จุดเด่น	1.80	0.94 ^{**}	3.66 [*]	0.20	3.29	0.96 ^{**}	2.14	0.97 ^{**}	2.34	0.90 ^{**}
ร่วมสมัย	2.17	0.96 ^{**}	3.74	0.75 ^{**}	3.86 [*]	0.90 ^{**}	2.89	0.95 ^{**}	2.17	0.96 ^{**}
เรียบง่าย	2.69	0.97 ^{**}	3.00	0.96 ^{**}	4.20 [*]	0.80 ^{**}	3.77	0.90 ^{**}	2.49	0.90 ^{**}
มีรสนิยม	2.11	0.97 ^{**}	3.83 [*]	0.74 ^{**}	3.83	0.95 ^{**}	2.40	0.90 ^{**}	2.23	0.96 ^{**}

* ค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่มีคะแนนค่าเฉลี่ยสูงสุดของแต่ละภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์

** ค่าแสดงความรู้สึกรู้สึกที่มีค่า MCC² มากกว่า 0.5



ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักษาน

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ				ค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงคุณลักษณะออกแบบ	แนวทางภาพใช้ในการออกแบบ	MCC ²	
		PCC	P-Value	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	CS				
1	รูปทรงของผลิตภัณฑ์	2.040	0.001	แบบกลม	1.490	0.000	แปลกใหม่	ภาพที่ 2	0.50
		2.274	0.000		4.250	0.000	น่าสนใจ	ภาพที่ 3	0.62
		4.000	0.000	แบบทรงเรขาคณิต	4.000	0.000	ร่วมสมัย	ภาพที่ 3	0.90
2	รูปทรงฐานโคมไฟ	2.000	0.002		2.000	0.000	มีรสนิยม	ภาพที่ 2	0.74
		2.274	0.000		3.500	0.000	น่าสนใจ	ภาพที่ 3	0.62
		4.000	0.000	แบบโค้งมน	2.000	0.000	ร่วมสมัย	ภาพที่ 3	0.90
		2.063	0.000		1.255	0.002	เรียบง่าย	ภาพที่ 3	0.80
		2.320	0.000		2.924	0.000	แปลกใหม่	ภาพที่ 2	0.50
3	ลวดลายของผลิตภัณฑ์	1.000	0.013	ลวดลายธรรมชาติ	1.000	0.000	น่าสนใจ	ภาพที่ 3	0.62
		1.744	0.000		1.744	0.000	เรียบง่าย	ภาพที่ 3	0.80
		1.000	0.006		1.000	0.001	มีรสนิยม	ภาพที่ 2	0.74
4	โทนสีของผลิตภัณฑ์	3.466	0.000		4.133	0.001	เอกลักษณ์	ภาพที่ 3	0.65
		1.800	0.000	โทนสีอ่อน	1.800	0.000	ร่วมสมัย	ภาพที่ 3	0.90
		0.531	0.020		0.531	0.004	เรียบง่าย	ภาพที่ 3	0.80
5	เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์	3.333	0.000	เอกลักษณ์ไทย	3.333	0.000	เอกลักษณ์	ภาพที่ 3	0.65
		0.969	0.019		0.750	0.000	น่าสนใจ	ภาพที่ 3	0.62
		3.000	0.000	เอกลักษณ์สากล	3.000	0.000	ร่วมสมัย	ภาพที่ 3	0.90
		3.000	0.000		3.000	0.000	มีรสนิยม	ภาพที่ 2	0.74

จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการคัดเลือกคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักษาน โดยนำผลจากตารางมาสรุปเป็นข้อกำหนดเพื่อใช้ในการออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สื่อถึงความรู้สึกต่าง ๆ สำหรับกลุ่มผู้ผลิตกระจุกจักษาน สามารถแปลผลการวิเคราะห์ให้เป็นรูปแบบของข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเพื่อส่งให้ผู้เชี่ยวชาญในการ

ออกแบบได้ชัดเจนมากขึ้น ข้อกำหนดการออกแบบมี 5 ข้อกำหนด เรียงตามระดับความสำคัญ ดังนี้

(1) คุณลักษณะด้านรูปทรงของผลิตภัณฑ์ ควรเน้นการออกแบบโคมไฟให้มีรูปทรงเป็นแบบกลมและออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้สื่อถึงความรู้สึก “แปลกใหม่” โดยการออกแบบสามารถดูแนวทางคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้จากตัวแทนผลิตภัณฑ์ ภาพที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4



(2) คุณลักษณะด้านรูปทรงฐานโคมไฟ ควรเน้นการออกแบบฐานโคมไฟให้มีรูปทรงเป็นทรงเรขาคณิตหรือมีรูปทรงเป็นแบบโค้งมน หรือมีการผสมผสานรูปทรงระหว่างรูปทรงเรขาคณิตและรูปทรงแบบโค้งมนเข้าด้วยกัน และออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้สื่อถึงความรู้สึก “น่าสนใจ ร่วมสมัย เรียบง่าย และมีรสนิยม” โดยการออกแบบสามารถดูแนวทางคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้จากตัวแทนผลิตภัณฑ์ ภาพที่ 2 และภาพที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4

(3) คุณลักษณะด้านลวดลายของผลิตภัณฑ์ ควรเน้นการออกแบบลวดลายของผลิตภัณฑ์ให้มีลวดลายธรรมชาติที่สื่อถึงเอกลักษณ์พื้นที่ทะเลสาบสงขลา และออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้สื่อถึงความรู้สึก “แปลกใหม่ น่าสนใจ เรียบง่าย และมีรสนิยม” โดยการออกแบบสามารถดูแนวทางคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้จากตัวแทนผลิตภัณฑ์ ภาพที่ 2 และภาพที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4

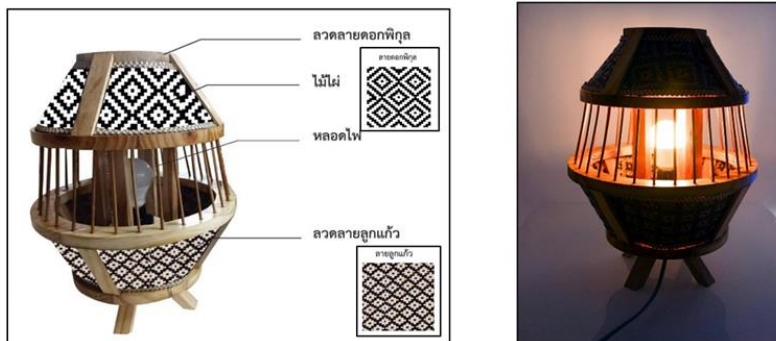
(4) คุณลักษณะด้านโทนสีของผลิตภัณฑ์ ควรเน้นการออกแบบโทนสีให้มีลักษณะเป็นสีอ่อนและออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้สื่อถึงความรู้สึก “ร่วมสมัย และมีเอกลักษณ์” โดยการออกแบบสามารถ

ดูแนวทางคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้จากตัวแทนผลิตภัณฑ์ ภาพที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4

(5) คุณลักษณะด้านเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ ควรเน้นการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สื่อถึงเอกลักษณ์แบบไทย เอกลักษณ์สากล หรือมีการผสมผสานระหว่างเอกลักษณ์ไทยกับเอกลักษณ์สากล และออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้สื่อถึงความรู้สึก “น่าสนใจ ร่วมสมัยมีรสนิยม และมีเอกลักษณ์” โดยการออกแบบสามารถดูแนวทางคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ได้จากตัวแทนผลิตภัณฑ์ ภาพที่ 2 และภาพที่ 3 แสดงดังตารางที่ 4

4.5 ผลการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

จากการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่สื่อถึงความรู้สึกในด้านต่าง ๆ ของการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจูดจักสาน ที่ออกแบบได้ใช้คำแสดงความรู้สึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์ 3 คำหลัก ๆ ได้แก่ น่าสนใจ แปลกใหม่ และมีเอกลักษณ์ อีกทั้งได้ออกแบบตามข้อกำหนดและแรงบันดาลใจในการออกแบบผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 7 นำมาออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจูดจักสาน



ตารางที่ 7 ข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักษาน

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
1	รูปทรงของผลิตภัณฑ์	โคมไฟมีรูปทรงเป็นลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีการดัดแปลงตัดทอนรูปทรงของทรงกลมมาใช้เป็นรูปทรงของโคมไฟ
2	รูปทรงฐานโคมไฟ	ฐานโคมไฟมีการผสมผสานรูปทรงระหว่างรูปทรงเรขาคณิตและรูปทรงแบบโค้งมนเข้าด้วยกัน
3	ลวดลายของผลิตภัณฑ์	ลวดลายที่นำมาใช้เป็นลวดลายธรรมชาติ โดยมีการผสมผสานลวดลายระหว่างลายลูกแก้วกับลายดอกพิกุลเข้าด้วยกัน เพื่อสื่อถึงเอกลักษณ์แบบไทย และความเป็นท้องถิ่น และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์รู้สึกถึงความแปลกใหม่
4	โทนสีของผลิตภัณฑ์	โคมไฟมีลักษณะโทนสีเป็นโทนสีอ่อน เพื่อให้ความรู้สึกถึงความร่วมสมัยที่มีอยู่ในตัวผลิตภัณฑ์
5	เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์	ได้มีการนำลวดลายการสานของดอกพิกุลกับลายลูกแก้วมาใช้ในการออกแบบลวดลายของโคมไฟ เพื่อสื่อถึงเอกลักษณ์แบบไทย และความเป็นท้องถิ่น

4.6 ผลการประเมินความพึงพอใจ

หลังจากได้สร้างขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักษาน จากนั้นผู้วิจัยได้นำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ พบว่า ผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้บริโภค ซึ่งเป็นนักท่องเที่ยว กลุ่มโรงแรม รีสอร์ท และร้านค้าตัวแทนจำหน่าย ในพื้นที่นครศรีธรรมราช สงขลา และพัทลุง ทั้งนี้มีความพึงพอใจด้านเอกลักษณ์มากที่สุดเป็นอันดับแรก มีระดับความพึงพอใจในระดับดีมาก เฉลี่ยเท่ากับ 4.54 ระดับความพึงพอใจประเด็นรองลงมาคือ ด้านลวดลาย มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.48 และด้านรูปทรงของผลิตภัณฑ์ มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.41

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมต้นเซร่วมกับแบบจำลองคาโน เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักษานประเภทของประดับตกแต่ง โดยผลิตภัณฑ์จะต้องสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้ ทางวิจัยได้เริ่มจากการประยุกต์ใช้วิศวกรรมต้นเซ ในการจัดทำแบบสอบถามที่ 1 เพื่อคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกหรือค่าคั่นเซของลูกค้ำที่มีต่อผลิตภัณฑ์จำนวน 75 ค่า พบว่า ที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 ทั้งหมด 32 ค่า เนื่องจากค่าคั่นเซมีจำนวนมากเกินไปจึงได้นำไปคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางจำนวน 5 ท่านอีกครั้งเพื่อสกัดค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้งหมด 9 ค่า จากนั้นทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองคาโน ในการจัดทำ



แบบสอบถามที่ 2 เป็นการสำรวจและวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความพึงพอใจและความไม่พึงพอใจของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ 13 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และ 27 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย โดยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในต้องผ่านการคัดกรองจากผู้เชี่ยวชาญและสามารถนำไปเป็นองค์ประกอบในการออกแบบผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 9 คุณลักษณะหลัก และ 19 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย ต่อมานำคำค้นเซเพื่อสำรวจด้านความรู้สึก และด้านคุณลักษณะที่มีต่อภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ โดยการเปรียบเทียบด้วยแผนผังกลุ่มเชื่อมโยง พบว่า มีภาพผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ภาพ ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ตรงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยมากที่สุด หลังจากนั้นทำการสร้างแบบสอบถามที่ 3 เพื่อสำรวจข้อมูลแบบลิเคิร์ต จากนั้น นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณที่อยู่ในรูปแบบของสมการพยากรณ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการวิเคราะห์ ผลการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจูดจักสาน พบว่าที่ทีมงานออกแบบได้ใช้ค่าแสดงความรู้สึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์โคมไฟ หลัก ๆ คือ นำสนใจ แปลกใหม่ และมีเอกลักษณ์ โดยมีการออกแบบรูปทรงของผลิตภัณฑ์เป็นทรงกลม โดยมีการดัดแปลง ตัดทอน รูปทรงของทรงกลมมาใช้เป็นรูปทรงของโคมไฟ และมีการออกแบบฐานโคมไฟให้มีการผสมผสานรูปทรงระหว่างรูปทรงเรขาคณิตและรูปทรงแบบโค้งมนเข้าด้วยกัน อีกทั้งมีโทสนีเป็นโทสนีอ่อนเพื่อให้ความรู้สึกถึงความร่วมสมัยที่มีอยู่ในตัวผลิตภัณฑ์ และได้มีการนำลวดลายการสานของดอกพิกุลกับลายลูกแก้วมาใช้ในการออกแบบลวดลาย

ของโคมไฟ เพื่อสื่อถึงเอกลักษณ์แบบไทย และความ เป็นท้องถิ่น ดังนั้นผลการวิจัย พบว่าผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจูดจักสานที่ได้รับการพัฒนาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งด้านรูปทรง รูปทรงฐาน ลวดลายการ สาน โทสนี และเอกลักษณ์นั้นสามารถตอบโจทย์และ สอดคล้องกับความต้องการเชิงอารมณ์ของลูกค้า ได้มากยิ่งขึ้น และกลุ่มผู้ผลิตสามารถนำไปใช้เป็น แนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ที่ สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่ กว้างขวางต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณ เงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี 2563 ขอขอบคุณกลุ่มผู้ผลิตกระจูด กระจูดศึกษา ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Rodchuen, Designing the basketry bamboo products from local wisdom, Community Enterprise basketry local handicrafts of Baan Dongchapl, Bangmafor sub-district, Krok phra district, Nakhon Sawan province, Art and Architecture Journal Naresuan University, 2017, 8(1), 12-13. (in Thai)
- [2] S. Maprasong, Krajoood and women: Change of resources and community management in a developmental context, Rusamilae Journal, 2015, 36(3), 54-73. (in Thai)



- [3] B. Muangmeesri, W. Vanpetch, S. Phongphit and C. Ekpetch, Design procedure development in bulrush reed product development by the community management: The case study of Tumbol Thasatorn, Amphur Phun-Phin, Surat Thani Province, NIDA Development Journal, 49(3), 2009 , 21-38. (in Thai)
- [4] W. Intanai, P. Panthasri and B. Julukun, Media design for promoting cultural tourism inspired by the way of life, local wisdom, and identities of folk performances appear in the Songkhla Lake Basin, The Academic Journal Faculty of Humanities and Social Sciences Nakhon Sawan Rajabhat University, 2021, 8(1), 124-140. (in Thai)
- [5] A. Suzianti, and A. Aldianto, Redesign of product packaging with Kansei engineering: Empirical study on Small-medium enterprises in Indonesia, Makara Journal of Technology, 2020, 24(2), 65-71.
- [6] K Pimapunnsri, New product development using Kansei engineering, The 2nd National Conference on Industrial Operations Development, (CIOD 2011), Proceeding, 2011, 331-337.
- [7] S. Yoswangjai, Product design and development for dinner chair of Kansei engineering, KKU Engineering Journal, 2014, 41(2), 191-200. (in Thai)
- [8] K. Prayoonwong, Application of Kansei engineering for new product development: conceptual wardrobe product design, Thesis, Industrial Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2012. (in Thai)
- [9] I.P. Tama, W. Azlia and D. Hardiningtyas Development of customer oriented product design using Kansei engineering and Kano model: Case study of ceramic souvenir, Procedia Manufacturing, 2015, 4, 328-335.
- [10] M. Kikumoto, Y. Kurita and S. Ishihara, Kansei engineering study on car seat lever position, International Journal of Industrial Ergonomics, 2021, 86, 103215.
- [11] M. Misaka and H. Aoyama, Development of design system for crack patterns on cup surface based on Kansei, Journal of Computational Design and Engineering, 2018, 5, 435-441.
- [12] U. Jaroenkietkajorn, and S.H. Gheewala, Interlinkage between water-energy-food for oil palm cultivation in Thailand, Sustainable Production and Consumption, 2020, 22, 205-217.
- [13] N. Kano, N. Seraku, F. Takahashi and S.I. Tsuji, Attractive quality and must-be quality, Journal of the Japanese Society for Quality Control, 1984, 14, 147-156.



- [14] H. Liu, Research on module selection method based on the integration of Kano module with QFD method, *Journal of Service Science and Management*, 2012, 5(2), 206-211.
- [15] Y. Akao, *Quality Function Deployment: Integrating customer requirements in to Product Design*, 1st Ed., Productivity Press, MA, USA, 1990.
- [16] B. Srisatidnarakul, *Development and validation of research instruments: psychometric properties*, Chulalongkorn University Printing House, Bangkok, Thailand, 2012. (in Thai)
- [17] R. Pongwiritthon, B. Kantawongwan, R. Sookmanee and C. Woraphicha, Marketing mix development guideline of Nonghoi royal project for sustainable agro-tourism by using Kano's model analysis, *Suranaree Journal of Social Science*, 2013, 7(1), 17-35. (in Thai)
- [18] N. Kumpong, and C. Kasemset, Application of Kansei engineering in food product development framework: A case study of parboiled rice, *Industrial Engineering Conference Network (IE-Network 2012)*, 2012, 2030-2037. (in Thai)



การวิเคราะห์ระบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบโดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา* ศุภฤกษ์ จันทร์ศุภเสน และ อลงกรณ์ นมะหุต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือนิวตและอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: issaraporn.a@eng.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 22 สิงหาคม 2565; วันที่บทความบทความ: 3 ตุลาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 4 ตุลาคม 2565
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอการจำลองผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นเองด้วยโปรแกรม MATLAB เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง การแก้สมการระบบที่ขึ้นกับเวลาจะใช้อัลกอริทึมการหาปริพันธ์เชิงตัวเลขของผลต่างย้อนหลัง ซึ่งผลลัพธ์จะแสดงผลทางกราฟิกของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ และทำการสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิหน้าด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลการทดสอบจริงอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยสูงสุดจากกล้องถ่ายภาพความร้อนและจากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ เท่ากับ $57.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ จากเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ และผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ; ไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ; อุณหภูมิ; การถ่ายเทความร้อน

The System Analysis and Build Prototype of Flat-plate Solar Collector by 3-D Finite Element Method

Issaraporn Amornsawatwattana^{*}, Suparoek Junsupasen and Alongkorn Namahoot

Department of Instrument and Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

^{*} Corresponding author, E-mail: issaraporn.a@eng.kmutnb

Received: 22 August 2022; Revised: 3 October 2022; Accepted: 4 October 2022

Online Published: 22 December 2022

Abstract: In this article, a mathematical model for temperature distribution in a flat-plate solar collector is proposed. The simulation employed the 3D finite element method developed by MATLAB programming by modeling the temperature distribution of the flat-plate solar collector mathematically in the second-order partial differential equations. To solve this time-dependent system, a step-by-step numerical integration of the backward difference algorithm is applied. The simulated result graphically revealed the temperature distribution in the flat-plate solar collector. A flat-plate solar collector has been prototyped and tested in a real environment. The results of temperature distribution using the 3-D finite element method have a maximum temperature of 62 °C. The actual measurement results from the thermal scan and the digital thermometer were 57.7 °C and 58.3 °C, respectively. The temperature result from the simulation model and the actual measurement are in good agreement.

Keywords: Flat-plate solar collector; 3-D finite element; Temperature; Heat transfer



1. บทนำ

อุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นระบบที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงรังสีคลื่นสั้นให้เป็นพลังงานความร้อนผ่านตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์โดยอาศัยหลักการเบี่ยงเบนของแสง ซึ่งเมื่อแสงตกกระทบวัตถุใด ๆ จะเกิดปรากฏการณ์เชิงแสง 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) การดูดกลืนแสง (2) การเปล่งแสง (3) การสะท้อนแสงและ (4) การส่งผ่านแสง หลังจากนั้นจะเกิดกระบวนการถ่ายโอนพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อโดยใช้หลักการเทอร์โมไซฟอนและได้นำร้อนออกมาในประเทศไทยถึงแม้ว่าจะเป็นประเทศในเขตร้อน แต่ก็พบว่าตามที่พักอาศัยหรือโรงแรมมีการติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนกันเป็นจำนวนมาก โดยเครื่องทำน้ำร้อนที่ได้รับความนิยมใช้ในบ้านพักอาศัย คือเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ประหยัดพลังงาน ซึ่งบทความวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิเลลิเมนต์ แบบ 3 มิติ ซึ่งพัฒนาขึ้นเองด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนท์อิเลลิเมนต์แบบ 3 มิติ และผลการทดสอบจริง

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปทฤษฎี และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบได้ดังนี้ Poomsawat (2019) [1] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยการวิเคราะห์การไหลแบบเทอร์โมไฟนอนต์ระบบปิดจะไม่มี การนำน้ำร้อนที่ได้จากการผลิตไปใช้งานพร้อมหาประสิทธิภาพที่แผงความร้อน สามารถทำได้ในแต่ละวัน โดยทดสอบเก็บค่าเป็นเวลา 5 วัน พบว่า

ค่าประสิทธิภาพที่ได้สูงสุดในแต่ละวัน มีค่า 55.8% อุณหภูมิสูงสุดได้เท่ากับ 60 °C, Loomans et al. (2003) [2] ได้ทำการพิจารณาถึงประสิทธิภาพอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิเลลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะวิเคราะห์อุณหภูมิของช่องระบายอากาศแผ่นโซลาร์เซลล์ครอบกระจก และแผงจนวนความร้อนซึ่งอุณหภูมิของของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิโดยรอบและความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น, Boonyaaroonnate (1980) [3] ได้ศึกษาและวิจัยชุดรับรังสีแบบแผ่นเรียบของระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยชุดรับรังสีแบบแผ่นทองแดงและแผ่นอะลูมิเนียมโดยใช้ท่อทองแดงขดไปมาบนแผ่นดูดรังสี เพื่อหาสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนทั้ง 2 แบบ พบว่าท่อทองแดงครึ่งทองแดงมีสมรรถนะสูงกว่าท่อทองแดงครึ่งอะลูมิเนียม, Intasith (2018) [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพ อัตราการไหลเชิงมวลของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ และชนิดหลอดแก้วสุญญากาศ พบว่าในประเทศไทยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบมีประสิทธิภาพดีที่สุดและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับชนิดอื่น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ใช้อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบเนื่องจากเหมาะสมกับประเทศไทยและมีราคาถูกในการสร้าง ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งหมดนี้พบว่ายังไม่ มีบทความวิจัยใดที่วิเคราะห์ระบบและสร้างอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิเลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองนั้นมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถวิเคราะห์อุณหภูมิ



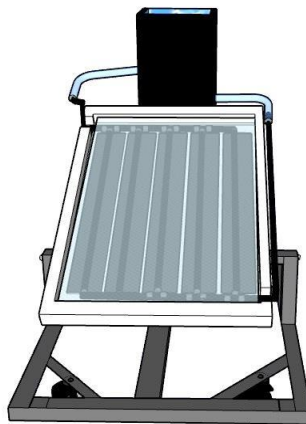
ภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดแผ่นเรียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

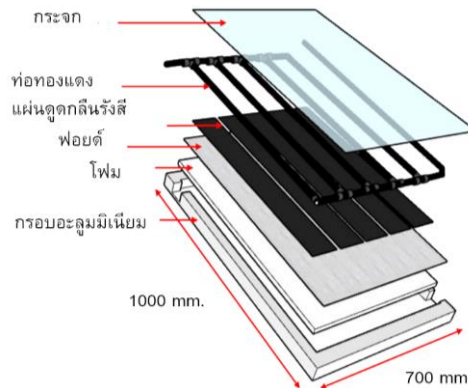
หลักการทำงานของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบจะใช้หลักการทางธรรมชาติที่เรียกว่าเทอร์โมไซฟอน คือน้ำเย็นในส่วนล่างของถังเก็บน้ำจะไหลลงสู่ส่วนล่างของแผงรับแสงอาทิตย์ น้ำเย็นเหล่านี้จะได้รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับแผง กลายเป็นน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งจะลอยตัวขึ้นเพราะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำเย็น และไหลไปตามท่อทองแดงที่อยู่ในแผงไหลกลับเข้าไปสู่ถังเก็บน้ำ และลอยตัวขึ้นไปสู่ส่วนบนของถังเก็บน้ำร้อนเป็นน้ำร้อนที่พร้อมจะนำไปใช้ได้ต่อไป ซึ่งทางน้ำเข้าแผงที่เป็นน้ำเย็นควรต่ำกว่าทางน้ำออกแผงซึ่งเป็นทางน้ำร้อน และควรวางถังน้ำให้สูงกว่าแผงรับแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำร้อนประมาณ 55°C - 62°C ขนาดแผง

กว้าง 700 mm. ยาว 1,000 mm. โดยอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบแสดงได้ดังรูปที่ 1 และส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ แสดงได้ดังรูปที่ 2 [5, 6]

- แผงรับแสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์
- แผ่นกระจก ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน ทั้งยังป้องกันฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกอีกด้วย
- แผ่นดูดกลืนรังสี เป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ทำหน้าที่ในการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนไปสู่ท่อทองแดง
- ท่อทองแดง จะได้รับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสี และจะถ่ายเทความร้อนไปให้น้ำภายในท่อ
- ฉนวนความร้อน ใช้โฟมชนิด EPS และฟอยด์ ซึ่งใช้บุภายใต้แผ่นดูดกลืนรังสี
- ถังเก็บน้ำร้อน ทำหน้าที่เก็บน้ำร้อนที่ผ่านมาจากแผงรับแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 1 อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ แสดงในสมการที่ (1) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย ดังนั้นจึงเลือกวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์มาใช้ในการคำนวณ [7]

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

โดยที่

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot ^\circ C$)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง (W/m^3)

T คือ อุณหภูมิ ($^\circ C$)

c คือ ความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot ^\circ C$)

ρ คือ ความหนาแน่นมวล (kg/m^3)

u คือ ความเร็วในทิศทาง x (m/s)

v คือ ความเร็วในทิศทาง y (m/s)

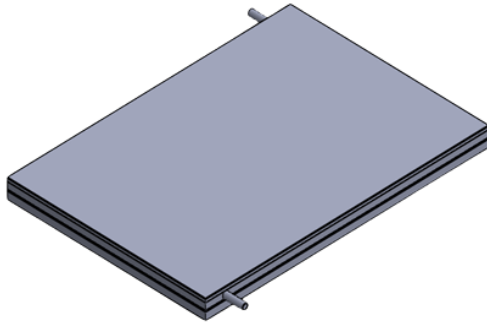
w คือ ความเร็วในทิศทาง z (m/s)

4. การคำนวณของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

หลักการของวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลลิเมนต์ ถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติ ในที่นี่จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนโนด หรือจุดเชื่อมต่อน้อยที่สุด โดยค่าเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนอิลลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นั้น [8] ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

4.1 อิลลิเมนต์ของระบบศึกษา

ในการออกแบบพื้นที่ของปัญหาที่ใช้ในการจำลองผลค่าอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ จะครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของแบบจำลอง การแบ่งพื้นที่ย่อยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks โดยแบ่งอิลลิเมนต์ด้วยรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Tetrahedron) ตลอดปริมาตร จะประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 39,224 จุดต่อ และจำนวนอิลลิเมนต์ 247,678 อิลลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 3



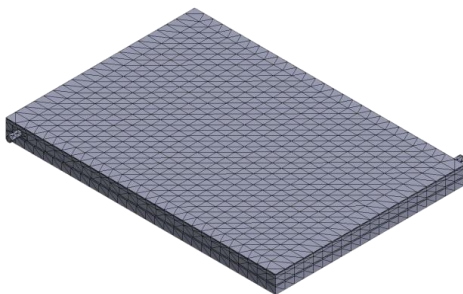
(ก) องค์ประกอบโดยรวมของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ



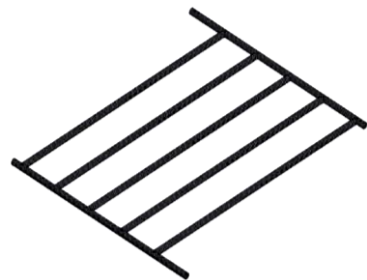
(ข) แสดงทางน้ำเข้าและทางน้ำออกของท่อทองแดง



(ค) ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ



(ง) การแบ่งอิลลิเมนต์แต่ละชั้นของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ



(จ) การแบ่งอิลลิเมนต์ท่อทองแดงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

รูปที่ 3 ส่วนประกอบทั้งหมดของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ



4.2 การสร้างสมการของอิลลิเมนต์

การสร้างสมการระดับอิลลิเมนต์ได้ประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษของกาเลอร์คิน โดยฟังก์ชันน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับฟังก์ชันประมาณภายใน (shape function) โดยผลลัพธ์ที่พิกัดใด ๆ แสดงดังสมการที่ (2) [9-11]

$$T(x, y, z) = T_1 N_1 + T_2 N_2 + T_3 N_3 + T_4 N_4 \quad (2)$$

โดยที่ N_n คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ และ T_n คือผลลัพธ์ของค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดต่อ เมื่อ $n = 1, 2, 3,$ และ 4 ซึ่งในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ แสดงดังสมการที่ (3)

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3)$$

โดยที่ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอิลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ แสดงดังสมการที่ (4)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

(4)

$$[C]_{4 \times 4} \left\{ \dot{T} \right\}_{4 \times 1} + \left[[K_c] + [K_v] + [K_h] \right]_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1} = \{Q_o\}_{4 \times 1} + \{Q_h\}_{4 \times 1} \quad (5)$$

$$[C]_{4 \times 4} = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4 (y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3 (y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2 (y_3 z_4 - y_4 z_3) \\ a_2 &= x_4 (y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3 (y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1 (y_4 z_3 - y_3 z_4) \\ a_3 &= x_4 (y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2 (y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1 (y_2 z_4 - y_4 z_2) \\ a_4 &= x_3 (y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2 (y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1 (y_3 z_2 - y_2 z_3) \\ b_1 &= y_4 (z_3 - z_2) + y_3 (z_2 - z_4) + y_2 (z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4 (z_3 - z_2) + y_1 (z_3 - z_4) + y_3 (z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4 (z_3 - z_2) + y_2 (z_1 - z_4) + y_1 (z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_3 (z_3 - z_2) + y_1 (z_2 - z_3) + y_2 (z_3 - z_1) \\ c_1 &= x_4 (z_2 - z_3) + x_2 (z_3 - z_4) + x_3 (z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_4 (z_3 - z_1) + x_3 (z_1 - z_4) + x_1 (z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4 (z_1 - z_2) + x_1 (z_2 - z_4) + x_2 (z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3 (z_2 - z_1) + x_2 (z_1 - z_3) + x_1 (z_3 - z_2) \\ d_1 &= x_4 (y_3 - y_2) + x_3 (y_2 - y_4) + x_2 (y_4 - y_3) \\ d_2 &= x_4 (y_1 - y_3) + x_1 (y_3 - y_4) + x_3 (y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_4 (y_2 - y_1) + x_2 (y_1 - y_4) + x_1 (y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_3 (y_1 - y_2) + x_1 (y_2 - y_3) + x_2 (y_3 - y_1) \end{aligned}$$

สมการที่ (5) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง โดยค่าของอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เกิดจากการอินทิเกรตและจะได้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การแก้ปัญหามาภายใต้สถานะชั่วคราวนี้ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง [12-13]

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 + d_1d_1 & b_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & b_1b_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & b_1b_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ b_2b_2 + c_2c_2 + d_2d_2 & b_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & b_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ b_3b_3 + c_3c_3 + d_3d_3 & b_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ b_4b_4 + c_4c_4 + d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sym

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[K_v]_{4 \times 4} = \frac{\rho c}{36} \begin{bmatrix} ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\{Q_c\}_{4 \times 1} = \frac{\rho V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\beta \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1/\beta) \left\{ T \right\}^t = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (13)$$

โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) และ T_∞ คือ อุณหภูมิของตัวกลาง สำหรับการพาความร้อน ($^\circ C$)

เนื่องจากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในบทความนี้เป็นการแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว ซึ่งใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ แสดงในสมการที่ (12) โดย Δt คือค่าของช่วงเวลา (Time Step) โดยให้ $\beta = 1$ เรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (Backward Difference) แสดงดังสมการที่ (13) เนื่องจากวิธีนี้รับประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง [13]

จากการเลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังสมการที่ (5) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (14) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (14) จะได้สมการเชิงเส้นเมื่อพิจารณาปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (15)

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + [[K_c] + [K_h] + [K_v]] \{T\}^{t+\Delta t} = \{\{Q_c\} + \{Q_h\}\}^{t+\Delta t} \quad (14)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C] + [[K_c] + [K_h] + [K_v]] \right) \{T\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C] \{T\}^t + \{\{Q_c\} + \{Q_h\}\}^{t+\Delta t} \quad (15)$$

5. การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

ขั้นตอนการหาค่าผลเฉลยของอุณหภูมิ เริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตให้แก่อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ ดังต่อไปนี้ [9]



- อุณหภูมิเริ่มต้น $T (t=0) = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient Temperature) $= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ ได้จากการวัดด้วย Lux Meter $= 241,428\text{ W/m}^3$
- อุณหภูมิของน้ำขาเข้า (Water Inlet Temperature) $= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ความเร็วของน้ำขาเข้า (Inlet water velocity) $= 50\text{ mm/sec}$
- สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ $= 50\text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$
- Time step $= 1$ นาที

6. ผลการจำลองอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

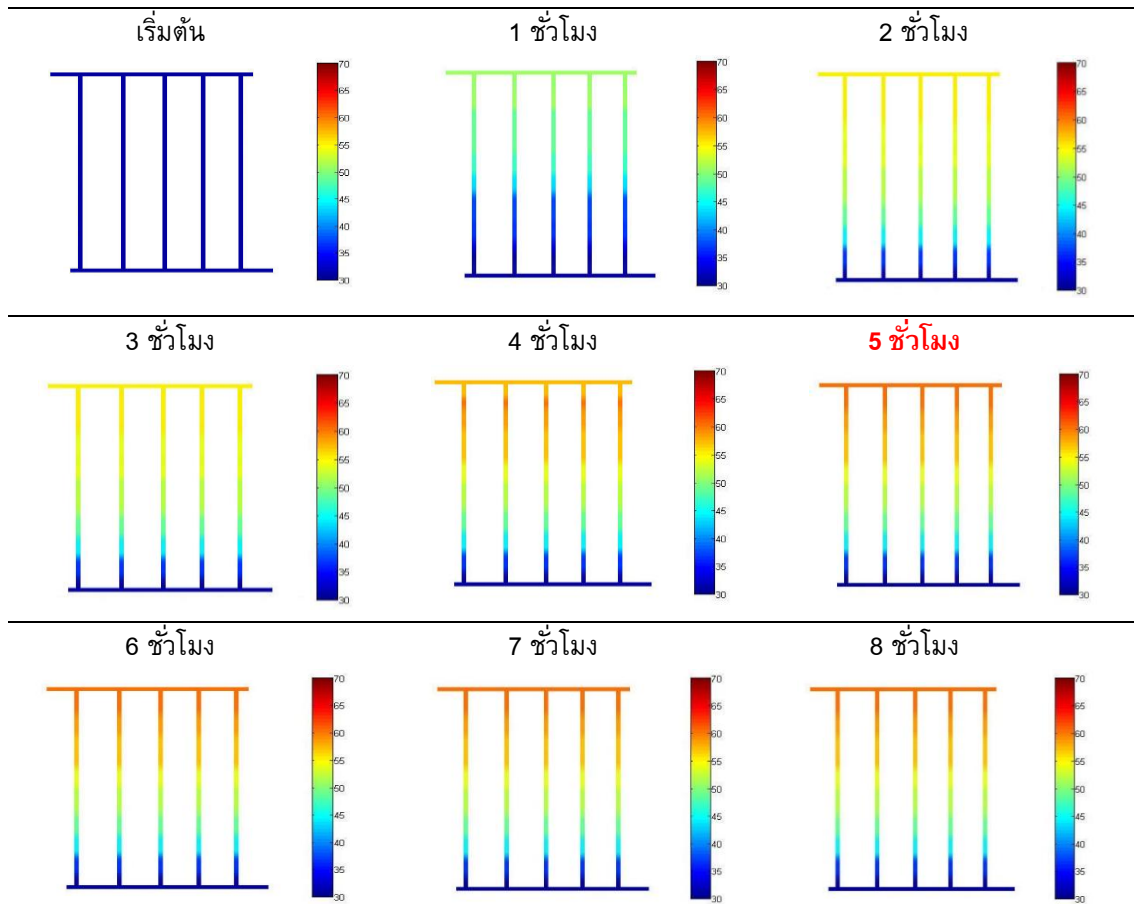
การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

ภายในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยจะจำลองผลดังต่อไปนี้

ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำแสดงดังรูปที่ 4 โดย ช่วงเริ่มต้นมีอุณหภูมิเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิในทุก ๆ โหนดค่าคำตอบ จากนั้นเมื่อระยะเวลาเริ่มผ่านไปอุณหภูมิน้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการสะสมความร้อน และเมื่อการสะสมความร้อนถึงท่อน้ำแล้ว น้ำจะเริ่มเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งตั้งแต่วเวลาประมาณช่วง 5 ชั่วโมง เป็นต้นไป น้ำจะอยู่ในสภาวะคงตัว เนื่องจากน้ำไหลออกไปเรื่อย ๆ และน้ำใหม่นั้นไหลเข้ามาแทนที่ตำแหน่งเดิม โดยอุณหภูมิสูงสุดของน้ำจะเท่ากับ $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ และโดยอุณหภูมิต่ำสุดของน้ำจะเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเท่ากับอุณหภูมิขาเข้าของน้ำ ซึ่งอุณหภูมิขาเข้าของน้ำจะมีค่า $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการจำลอง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ [9]

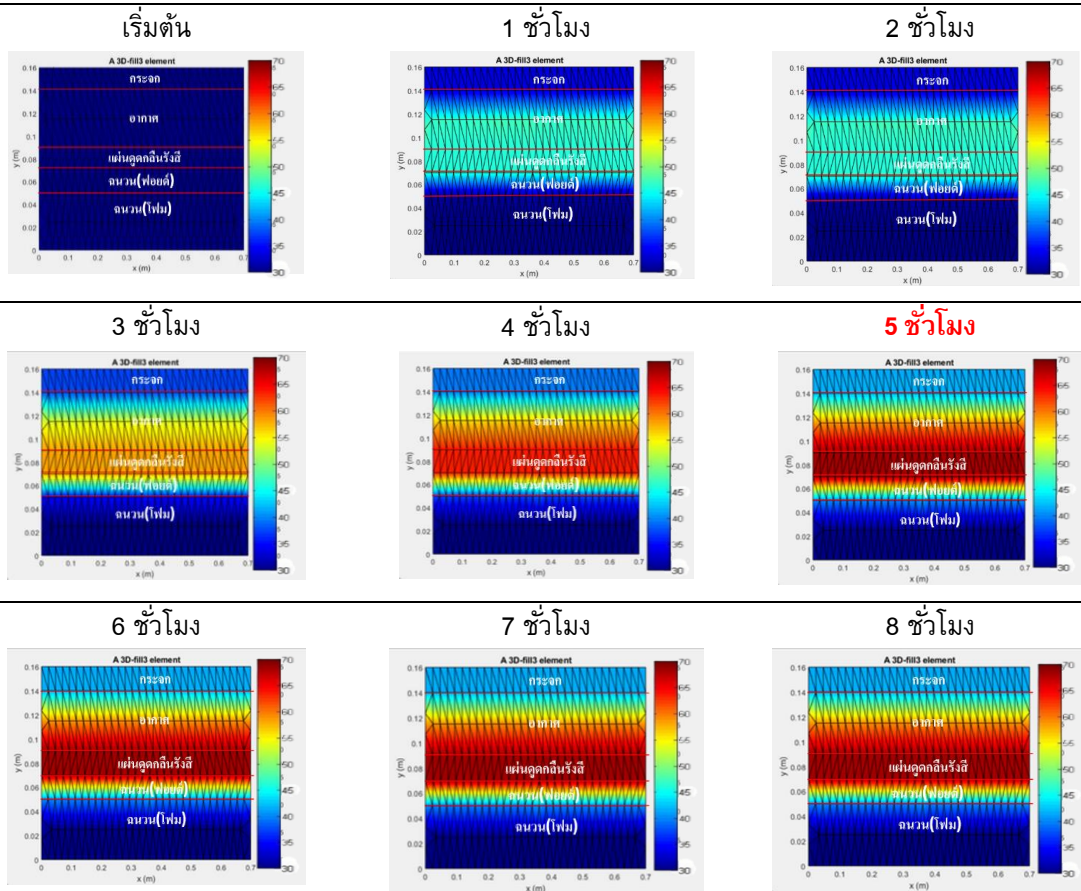
วัสดุ	$k (W/m\cdot^{\circ}C)$	$C (J/kg\cdot^{\circ}C)$	$\rho (kg/m^3)$
กระจก	1.05	840	2600
แผ่นดูดกลืน	205	896	2700
อากาศ	0.024	1005	1.2
ฟอยล์	0.0395	1200	2.6989
โพลัม	0.031	1500	30
ท่อ	400	385	8700
น้ำ	0.6	4187	1000



รูปที่ 4 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) น้ำ ที่แปรตามเวลา

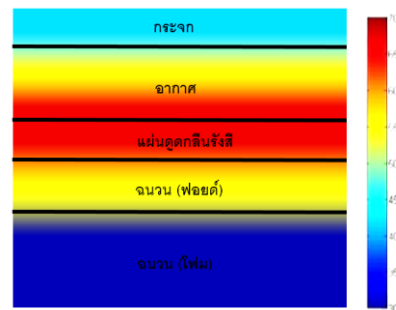
ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ แสดงดังรูปที่ 5 โดยจะกำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 30 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มแรกจากการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิทุก ๆ โหนดค่าคำตอบจากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการสะสมความร้อนทุกชั่วโมงที่แสงแดดส่อง มายังอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ และ

การถ่ายเทความร้อนของแผ่นดูดกลืนรังสีมายังท่อน้ำ ซึ่งท่อน้ำจะถ่ายเทความร้อนมายังน้ำ ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณน้ำ จากนั้นชั้นของฟอยด์และโพนจะทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก ทำให้อุณหภูมินั้นจะค่อย ๆ ลดลงจากชั้นของฟอยด์มายังโพน ซึ่งอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ จะเท่ากับ 30 °C และ 68.3 °C ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ภายในของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดแผ่นเรียบ ที่แปรตามเวลา

และได้นำค่าพารามิเตอร์ เงื่อนไขเริ่มต้น และ เงื่อนไขขอบเขต ไปจำลองผลในโปรแกรมสำเร็จรูป Comsol ดังรูปที่ 6 ซึ่งผลการจำลองอุณหภูมิของน้ำ ในงานวิจัยนี้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง เท่ากับ 62°C และในโปรแกรมสำเร็จรูป Comsol เท่ากับ 61.41°C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6 ผลการจำลองในโปรแกรมสำเร็จรูป Comsol



7. การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ มีขนาดกว้าง 700 mm. ยาว 1,000 mm. วางทำมุม 30 องศา จากแนวระดับ ประกอบด้วยกระจกหนา 6 mm. มีหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากแผงรับรังสี อีกทั้งยังป้องกันฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกไม่ให้เข้าไปข้างในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ต่อมาจะเป็นท่อทองแดงซึ่งนำความร้อนได้ดี ขนาด 4 หุน เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm. หนา 2 mm. อัดรัดติดกับแผ่นดูดกลืนรังสีทำมาจากอะลูมิเนียม ซึ่งทำสีดำเพื่อดูดกลืนความร้อนได้มากขึ้น โดยที่แผ่นดูดกลืนรังสีจะถ่ายเทความร้อนมายังท่อน้ำ ซึ่งท่อน้ำจะถ่ายเทความร้อนมายังน้ำ

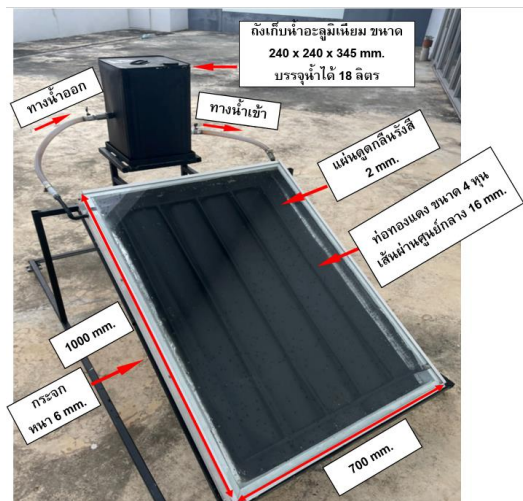


รูปที่ 7 อุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

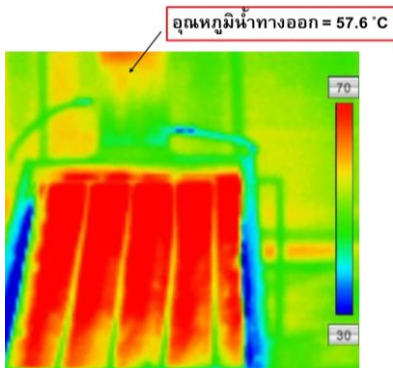
จากนั้นจะเป็นชั้นของฟอยด์และโพลีเอทิลีนจะทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก และถึงน้ำทำจากสแตนเลสไม่เป็นสนิมบรรจุน้ำได้ 18 ลิตร สามารถทนความร้อนได้สูง โดยที่ทางน้ำเข้าแผงจะต่ำกว่าทางน้ำออกจากแผง และต้องวางตั้งให้สูงกว่าแผงรับแสงอาทิตย์ โดยรูปที่ 7 แสดงอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ และรูปที่ 8 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ [14-16]

8. ผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการนำผลการทดสอบจริงที่ได้จากการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน และดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ โดยทดสอบจริงทั้งหมด 3 วัน แสดงดังรูปที่ 9



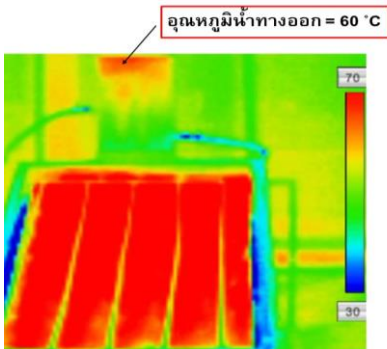
รูปที่ 8 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดแผ่นเรียบ



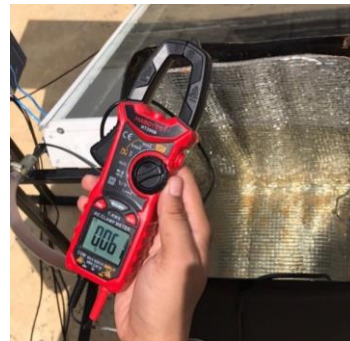
(ก) ผลการทดสอบจริงวันที่ 1 จากกล้องถ่ายภาพความร้อน



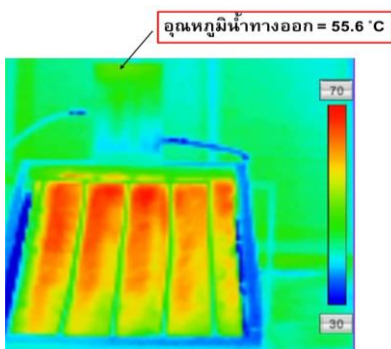
(ข) ผลการทดสอบจริงวันที่ 1 จากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์



(ค) ผลการทดสอบจริงวันที่ 2 จากกล้องถ่ายภาพความร้อน



(ง) ผลการทดสอบจริงวันที่ 2 จากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์



(จ) ผลการทดสอบจริงวันที่ 3 จากกล้องถ่ายภาพความร้อน



(ฉ) ผลการทดสอบจริงวันที่ 3 จากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

รูปที่ 9 ผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ



8. การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ กับผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ กับผลการทดสอบจริงโดยวัดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน และดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ ของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ แสดงได้ดังตารางที่ 2

จากผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนและดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ เป็นเวลา 3 วัน ได้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในน้ำ คือ 57.7 °C และ 58.3 °C ตามลำดับ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับ 62.0 °C พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการจำลองกับผลการทดสอบจริงโดยใช้กล้อง

ถ่ายภาพความร้อนและดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ เท่ากับ 7.45% และ 6.34% ตามลำดับ เกิดจากในการทดสอบจริงบางเวลามีเมฆมาก และอุณหภูมิจากแสงอาทิตย์ไม่คงที่ ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งผลที่ได้นั้นพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

9. บทสรุป

ผลการทดสอบจริงโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนและดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ ในการวัดอุณหภูมิของน้ำ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิด้านบนของท่อจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของท่อ และอุณหภูมิด้านบนของถังน้ำจะสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่างของถังน้ำ ซึ่งเป็นไปตามหลักการของเทอร์โมไซฟอน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ กับผลการทดสอบจริงของอุปกรณ์ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

ค่าอุณหภูมิ	ผลการจำลอง		ผลการทดสอบจริง	
	อุณหภูมิน้ำที่ได้จากการจำลองโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์	อุณหภูมิน้ำสูงสุดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน	อุณหภูมิน้ำสูงสุดจากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์	อุณหภูมิน้ำสูงสุดจากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์
อุณหภูมิจากการวัดวันที่ 1	62.0 °C	57.6 °C	58.0 °C	
อุณหภูมิจากการวัดวันที่ 2	62.0 °C	60.0 °C	61.0 °C	
อุณหภูมิจากการวัดวันที่ 3	62.0 °C	55.6 °C	56.0 °C	
อุณหภูมิเฉลี่ย	62.0 °C	57.7 °C	58.3 °C	
ค่าความคลาดเคลื่อน	-	7.45 %	6.34%	



10. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Poomsawat, A study of the efficiency of a solar water heater, Srinakharinwirot University Engineering Journal, 2019, No. 14(1), 67-77.
- [2] M. Loomans, H. Oversloot, A. de Bondt, R. Jansen and H. van Rij, Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements, The 8th International Building Performance Simulation Association, Proceeding, 2003, 745-752.
- [3] G. Boonyaaronnate, Thermal performance of solar water heater integrated vacuum tube with thermosyphon contain with phase change material, Thesis, Silpakorn University, 2015.
- [4] S. Intasith, Performance study of solar roof hot Water copper prallel fin tubes collector type with phase change material (PCM), Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2018.
- [5] S. Riamsuwan, Comparison of hot water systems between using heat pump and using flat plate solar collector for residential building, Thesis, Chulalongkorn University, 2011.
- [6] K. Dumeedae, S. Sueyu, and S. Kasor, Solar water heater hybrid with electric, YRU Journal of Science and Technology, 2017, 2(1), 65-75.
- [7] M.A. Bhatti, Advanced topics in finite element analysis of structures: With mathematica and MATLAB computations, John Wiley & Sons, NY, USA, 2006.
- [8] P. Dechaumphai, Numerical method in engineering, 9th Ed., Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2014.
- [9] I. Amornsawatwattana, and P. Poa-la-or, Analysis of temperature in solar thermal by 3-D finite element method, The 5th International Electrical Engineering Congress, Proceeding, 2017, 208-211.
- [10] S. Nattawut, and P. Padej, Analysis of insulation performance in various types inside freezer of the refrigerator by 3-D finite element method, The 14th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), Proceeding, 2018, 16-19.
- [11] R.W. Lewis, P. Nithiarasu, and K.N. Seetharamu, Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow, John Wiley & Sons, Ltd., NY, USA, 2004.
- [12] S. Vacharakup, M. Peerasaksophol, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-la-or, Study of natural frequencies and characteristics of piezoelectric transformers by using 3-D finite element method, Applied Mechanics and Materials, 2012, 61-66.
- [13] S. Puangcharomchai, A Modeling of Heat Transfer in cooling Coil using Finite element Method, Thesis, Mechanical Engineering, Phranakhon Rajabhat University, Thailand, 2005.



- [14] G.L. Morrison, I. Budihardjo, and M. Behnia, Water in glass evacuated tube solar water heaters, *Solar Energy*, 2004, 76(1-3), 135-140.
- [15] M. Smyth, P.C. Eames and B. Norton, Integrated collector storage solar water heaters, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2006, 10(6), 503-538.
- [16] W. Chun, Y.H. Kang, H.Y. Kwak and Y.S. Lee, An experimental study of the utilization of heat pipes for solar water heaters, *Applied Thermal Engineering*, 1999, 19(8), 807-817.



อิทธิพลของสารเคลือบฐานชีวภาพชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติของกระดาษ

สุรัชย์ ชันแก้ว¹ ชลลดา แต่งเทศ¹ ชโลทร หุ่นสุวรรณ¹ และ กานต์พิชชา สุวรรณวัฒน์เมธี^{1,2*}

¹ สาขาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ศูนย์นวัตกรรมออกแบบและสื่อคอนเวอร์เจนท์ คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kanpicha_s@rmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 5 พฤษภาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 29 กันยายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 17 ตุลาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบฐานชีวภาพชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติของกระดาษ ซึ่งในการทดลองจะเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) 3 ระดับ คือ 1, 1.5, 2 % (w/v) และกลีเซอรอล (Glycerol) 3 ระดับ คือ 0.5, 0.75, 1 % (w/v) และทำการเคลือบลงบนกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 150 กรัมต่อตารางเมตร จำนวน 1 ชั้น ด้วยแท่งเคลือบเบอร์ 4 ที่ระดับความหนา 34 ไมครอน จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางด้านการพิมพ์ ผลการทดลอง พบว่า กระดาษที่เคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส ส่งผลต่อสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว ความต้านทานแรงดันทะลุ ความต้านทานการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้กระดาษมีความมันวาวสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาสมบัติทางด้านการพิมพ์ กระดาษที่เคลือบสามารถเก็บรายละเอียดทางด้านตัวอักษรได้ดี และสามารถพิมพ์งานได้ขอบเขตสีที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: สารเคลือบ; คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส; สมบัติกระดาษ

Influences of Carboxymethyl Cellulose Bio-based Coating on Paper Properties

Surachai Khankaew¹, Chonlada Tangtet¹, Chalothon Hunsuwan¹ and Kanpicha Suwannawanamatee^{1, 2*}

¹ Program of Digital Printing and Packaging Technology, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

² Innovation Design and Convergence Media Center, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

* Corresponding author, E-mail: kanpicha_s@rmutt.ac.th

Received: 5 May 2022; Revised: 29 September 2022; Accepted: 17 October 2022

Online Published: 22 December 2022

Abstract: This research aims to study the influence of carboxymethyl cellulose bio-based coatings on the properties of paper. In the experiment, the changes appeared from three levels of carboxymethyl cellulose (CMC) concentrations which were 1, 1.5, 2 % (w/v) and three levels of Glycerol which were 0.5, 0.75, 1 % (w/v). Then, they were coated on paper with a standard weight of 150 g/m², 1 layer with a bar coater no.4 at the thickness of 34 microns. Later, they were tested for mechanical properties and printability properties. The results found that the paper was coated with carboxymethyl cellulose resulting in tensile strength and elongation properties, bursting strength, and increasing water absorption resistance. It also boosted paper gloss. For printability properties, the coated paper held great font details and can print to an increased color gamut as well.

Keywords: coatings; carboxymethyl cellulose; paper properties



1. บทนำ

กระดาษเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้และเกี่ยวข้องกับ การดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์มากที่สุด เนื่องจาก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycled) กระดาษ ยังเป็นที่นิยมและเป็นส่วนประกอบสำคัญในผลิตภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ และที่สำคัญกระดาษถูก นำมาใช้เป็นสื่อกลางสำหรับการศึกษาและการสื่อสาร การประชาสัมพันธ์ รวมถึงสิ่งพิมพ์ประเภทหนังสือ ตำราเรียน และสื่อสิ่งพิมพ์ต่างๆ [1] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบหลักของกระดาษคือเซลลูโลส ซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้เป็นข้อจำกัดสมบัติของกระดาษ ด้านการสกัดกันไอน้ำ ทำให้ความชื้นสามารถซึมผ่าน ได้ และเมื่อกระดาษอยู่ในสภาพที่มีความชื้นสูงจึง สูญเสียความแข็งแรง และเป็นผลให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงทางกายภาพของกระดาษ [2]

การเคลือบผิวกระดาษเป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้ใน การปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางแสงและ ความสม่ำเสมอของผิวกระดาษ โดยทั่วไปแล้วกระดาษ จะเคลือบด้วยวัสดุสังเคราะห์ที่ไม่ใช่อินทรีย์ประเภท ต่าง ๆ เช่น ดินขาว (Kaolin) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) ที่ใช้กับ สารยึดเกาะต่าง ๆ ตลอดจนพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีสังเคราะห์หลายชนิด นี้ หากไม่ได้รับการควบคุมอย่างเหมาะสม อาจนำไปสู่ มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมาก วัสดุเหล่านี้ไม่ สามารถนำไปรีไซเคิลและไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ อย่างรวดเร็ว และไม่เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการเปลี่ยนสารเคลือบทั่วไปด้วยวัสดุ ธรรมชาติที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Hamada และคณะ ได้ศึกษาการเคลือบด้วยวัสดุนา โนไฟบริลเซลลูโลส (NFC) และพิมพ์ด้วยระบบการ พิมพ์ที่ใช้หมึกพิมพ์ฐานน้ำ (Water-based Ink) เพื่อ ศึกษาคุณภาพการพิมพ์ โดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ ชั้นเคลือบที่แตกต่างกันบนแผ่นเส้นใยสังเคราะห์ และ วัดผลจากอัตราการดูดซึมหมึกพิมพ์และค่าความต่ำ (Density) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีจะเคลือบอยู่บนชั้นของ NFC ในส่วนของระบบการพิมพ์พ่นหมึก (Ink Jet) จะ สามารถซึมผ่านชั้นที่เคลือบด้วย NFC ได้ [3] Dussadeeworrarak และคณะ ได้ทดลองการเคลือบ นาโนฟิล์มด้วยโครเมียมออกไซด์ [4] Dimic-Misic และ คณะได้ทำการศึกษาอัตราส่วนสารเคลือบประเภทผงสี (Pigment) ได้แก่ ดินขาว (kaolin) และแคลเซียม คาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ร่วมกับคาร์บอกซิ เมทิลเซลลูโลส (CMC) และนาโนไฟบริลเซลลูโลส (NFC) ผลการทดลองพบว่า การลดปริมาณ CMC และ เพิ่ม NFC ในแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้โครงสร้างของ สารเคลือบมีผิวที่หยาบมีรูพรุนมากในส่วนของดินขาว จะมีโครงสร้างรูพรุนที่ใหญ่กว่าแคลเซียมคาร์บอเนต [5] González และคณะทำการศึกษารเปรียบเทียบสมบัติ ของเยื่อคัลลิปตัสฟอกขาวทั้งก่อนและหลังการใช้ เซลลูโลสนาโนไฟบริล (Cellulose Nanofibrils: CNF) พบว่าการเพิ่ม CNF ลงในเยื่อกระดาษฟอกขาวเหมาะ สำหรับการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน [6]

คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่ผลิตขึ้นโดยนำ หมู่มาร์บอกซิลไปเป็นโมเลกุลเซลลูโลสแบบตาข่าย ซึ่ง ได้รับความสนใจอย่างมากในการเคลือบวัสดุประเภท



กระดาษเป็นหลัก สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุอาหารเนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำ พร้อมใช้งาน มีความสะดวกในการผลิตกระดาษอีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี [7]

อย่างไรก็ตามจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและการพัฒนาวัสดุทางชีวภาพซึ่งมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและเป็นทางเลือกใหม่สำหรับนักวิชาการและอุตสาหกรรม ในการทำงานร่วมกันที่จะพัฒนาเป็นทางเลือกสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ยั่งยืน โดยใช้เทคนิคการเคลือบที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น การเคลือบหลายชั้น (Multilayer Coating) นาโนคอมโพสิต (Nanocomposites) ที่สามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้ โดยการออกแบบเพื่อให้ได้การสกัดสัณฐานได้ดีที่สุดซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีกระบวนการระบุแน่ชัดถึงปริมาณที่เหมาะสมในการเคลือบผิวกระดาษอีกทั้งการใช้ร่วมกับวัสดุอื่น [8] ดังนั้นจึงต้องหาปริมาณการเคลือบที่เหมาะสมกับวัสดุอื่นที่ใช้เคลือบร่วมเพื่อให้การเคลือบกระดาษมีประสิทธิภาพ จึงเป็นวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบชีวภาพชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติของกระดาษ เพื่อกำหนดเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมสารเคลือบ

เตรียมสารเคลือบโดยชั่งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxy Methyl Cellulose: CMC, Sigma-Aldrich, USA) และกลีเซอรอล ความเข้มข้น 99 % (Glycerol, Calbiochem, Germany) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นหรือพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) และน้ำไร้ประจุ (Deionized Water, DI-water) ตามลำดับ ผสมสารทั้งสองให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนระบบแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของปริมาณของสารเคลือบ

สูตร	CMC (% w/v)	Glycerol (% w/v)
CMC1A	1	0.5
CMC1B	1	0.75
CMC1C	1	1.0
CMC1.5A	1.5	0.5
CMC1.5B	1.5	0.75
CMC1.5C	1.5	1.0
CMC2A	2	0.5
CMC2B	2	0.75
CMC2C	2	1.0

(Magnetic Stirrer, Yellow Line) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นปิดปากภาชนะด้วยฟิล์มพลาสติกและทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) เพื่อให้ฟองอากาศออกให้หมด ในการเตรียมสารเคลือบได้เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารเคลือบที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 1 และในการทดลองจะทำจำนวน 5 ซ้ำ

2.2 การเคลือบกระดาษ

นำกระดาษอาร์ตการ์ดที่มีน้ำหนัก 150 กรัมต่อตารางเมตร ตัดขนาด 148 x 210 มิลลิเมตร วางบนแท่นรองรับ จากนั้นเทสารเคลือบลงบนกระดาษจากทางขวาไปซ้ายให้ทั่วบริเวณด้านบนกระดาษและทำการปาดสารเคลือบด้วยแท่งเคลือบเบอร์ 4 ที่ระดับความหนา 34 ไมครอน (Bar coater No.4) ปาดด้วยมือให้น้ำหนักในการปาดตั้งแต่ด้านบนถึงด้านล่างกระดาษอย่างสม่ำเสมอ เคลือบบนกระดาษเพียงด้านเดียว จากนั้น นำกระดาษที่ผ่านการเคลือบวางไว้ในอุณหภูมิ



27 องศาเซลเซียส เพื่อให้กระดาษแห้งตัว นำแผ่นกระดาษไปรีดด้วยอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ความเร็ว 100 รอบ/นาที รีดจำนวน 2 รอบเพื่อให้กระดาษเกิดความเรียบเพิ่มมากขึ้น

2.3 การทดสอบสมบัติของกระดาษ

2.3.1 การวัดความหนากระดาษ (Thickness Measurement)

วัดความหนากระดาษ (Thickness Measurement) วัดโดยใช้เครื่องวัดความหนาแบบดิจิทัล (TECLOCK US-22B Upright Stand) ในการวัดแต่ละตัวอย่างจะวัดจำนวน 5 จุด ทั้งกระดาษเคลือบและไม่เคลือบจำนวน 5 ซ้ำ

2.3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว (Tensile Strength and Elongation)

การทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว (Tensile Strength and Elongation) (มาตรฐาน ASTM D 828) ตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้างขนาด 25 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 250 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Testing, Instron, USA) โดยเครื่องจะยึดชิ้นทดสอบด้วยปากจับทั้งสองด้าน โดยมีระยะห่างระหว่างปากจับเป็น 180 มิลลิเมตร และดึงด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปากจับคงที่ 25.4 มิลลิเมตรต่อวินาที ดึงจนชิ้นทดสอบขาด ทำซ้ำทั้งหมด 5 ซ้ำ

2.3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength)

การทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength) (มาตรฐาน ASTM D 774) ตัดชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 80 x 80 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำเข้าเครื่อง

ทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (PAP2056, PAP, PAP-TECH Engineer & Associates, India) ทำซ้ำทั้งหมดจำนวน 5 ซ้ำ

2.3.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Adsorption)

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Adsorption) (วิธีของ Tappi T441) ตัดชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 125 x 125 มิลลิเมตร นำไปชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปใส่อุปกรณ์ทดสอบการดูดซึมน้ำ (Cobb Sizing Tester, Gurley, 4180cn, USA) เหน้าในบีกเกอร์ขนาด 100 ml ลงบนกระดาษทดสอบพร้อมจับเวลา 120 วินาที เมื่อเหลือเวลา 15 วินาทีก่อนครบกำหนดให้เทน้ำออกจากกระดาษทดสอบนำไปซับกับกระดาษแล้วกลิ้งด้วยลูกกลิ้ง 2-3 รอบ จึงนำไปชั่งน้ำหนัก และหาค่าการดูดซึมน้ำจากสมการที่ (1)

$$\text{Final Weight (g)} - \text{Conditioned Weight (g)} \times 100 \quad (1)$$

2.3.5 การทดสอบความมันวาว (Gloss)

นำแผ่นตัวอย่างวัดค่าความมันวาว (Gloss, Multi Gloss GM-268 Plus Gloss Meter, Konika Minolta, Germany) โดยการกำหนดองศาที่ใช้วัด 75 องศา ตัวอย่างละ 5 จุด ทำซ้ำทั้งหมดจำนวน 5 ซ้ำ

2.3.6 การหาค่าปริมาณความชื้นของกระดาษ (Moisture Content-Oven-Drying Method)

การหาค่าความชื้นของกระดาษ (Moisture Content-Oven-Drying Method) ตัดตัวอย่างขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร นำมาชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ และทำการอบที่อุณหภูมิ 105 ±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จนกระดาษแห้ง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังการอบ และหาค่าผลต่างของน้ำหนักจากสมการ (2)

$$\frac{W1 - W2}{W1} \times 100 \quad (2)$$

โดย W1 = Weight before Baking (g)

W2 = Weight after Baking (g)

2.4 การทดสอบสมบัติด้านการพิมพ์

2.4.1 การวิเคราะห์ค่าสี ความแตกต่างสี ขอบเขตสี และค่าความดำ

นำตัวอย่างทดสอบกระดาษการ์ดที่ผ่านการเคลือบและกระดาษการ์ดที่ไม่เคลือบพิมพ์แบบทดสอบทางการพิมพ์ (Test Form) ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบการพิมพ์พ่นหมึกความละเอียด 1,200 dpi (Ink Jet Canon, G2010- PIXMA G2010) วัดค่าสี L^* , a^* และ b^* ค่าความดำ โดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Spectro Densitometer, X-rite, Printed in USA) และคำนวณหาค่าความแตกต่างสี (Delta E, ΔE ,) ได้ดังสมการที่ (3)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (3)$$

2.4.2 การวิเคราะห์งานพิมพ์บนกระดาษ

การวิเคราะห์งานพิมพ์บนตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์แบบทดสอบทั้งกระดาษที่เคลือบและไม่เคลือบวิเคราะห์โดยใช้สายตาของผู้อ่าน ประกอบด้วย ขนาดตัวอักษร ขนาดเส้น รายละเอียด โดยวางชิ้นงานในตู้เทียบสีงานพิมพ์ภายใต้สภาวะแสง D65 (Pantone Color Viewing, Just-normlicht, Germany) มีระยะการมอง 20 เซนติเมตร

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 สมบัติของกระดาษ

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าความหนาของกระดาษที่เคลือบ พบว่า กระดาษที่เคลือบด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ร่วมกับกลีเซอรอล

(Glycerol) ส่งผลให้มีความหนาของกระดาษโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบโดยกระดาษที่มีความหนามากที่สุดคือกระดาษที่เคลือบด้วย CMC ความเข้มข้น 2 % (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 0.75 % (w/v) และกระดาษที่เคลือบด้วย CMC ความเข้มข้น 2 % (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 1 % (w/v) เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของ CMC ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความหนืดของสารเคลือบที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเมื่อทำการเคลือบลงบนกระดาษทำให้สารเคลือบสามารถซึมลงไปในช่วงว่างระหว่างเส้นใยได้ ซ้ำจึงเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ บนพื้นผิวของกระดาษ

ความต้านทานแรงดึง ของกระดาษที่เคลือบและกระดาษที่ไม่เคลือบ พบว่า กระดาษที่เคลือบมีความต้านทานแรงดึงโดยเฉลี่ยมากกว่ากระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยกระดาษที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือ กระดาษที่เคลือบด้วย CMC ความเข้มข้น 1 % (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 0.5 % (w/v) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 41.40 Mpa ในส่วนของระยะการยืดตัวของกระดาษ พบว่า กระดาษที่เคลือบสามารถมีระยะการยืดตัวได้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่เคลือบ โดยกระดาษที่สามารถยืดตัวได้สูงสุดคือกระดาษที่เคลือบด้วย CMC ความเข้มข้น 1.5 % (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 1 % (w/v) ตามลำดับ

ความต้านทานแรงดันทะลุ พบว่า กระดาษที่ผ่านการเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุที่เพิ่มมากขึ้นโดยกระดาษที่เคลือบด้วย CMC ความเข้มข้น 1 % (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 0.5 % (w/v) ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนที่สูงหมู่ไฮดรอกซิลบน CMC สามารถ



ตารางที่ 2 สมบัติของกระดาษที่เคลือบและไม่เคลือบ

กระดาษทดสอบ	Thickness (mm)	Tensile Strength (Mpa)	Elongation (%)	Bursting Strength (kg/km ²)	Water Absorption (g/m ²)	Gloss (GU)	Moisture Content (%)
Control	0.170	33.42 ±1	4.1 ±0.3	4.5 ±0.4	127.0 ± 9	5.7 ±0.2	5.5 ±2
CMC1A	0.178	40.40 ±3	4.5 ±0.5	5.0 ±0.4	81.5 ± 9	7.1 ±0.1	6.7 ±5
CMC1B	0.180	40.28 ±3	4.7 ±0.3	4.6 ±0.2	72.5 ± 9	5.9 ±0.1	3.4 ±3
CMC1C	0.180	41.40 ±2	5.0 ±0.5	4.8 ±0.2	78.0 ± 7	6.3 ±0.2	2.8 ±3
CMC1.5A	0.176	41.28 ±2	4.8 ±0.5	4.7 ±0.2	83.2 ± 8	7.0 ±0.4	4.8 ±5
CMC1.5B	0.176	41.16 ±2	4.3 ±0.2	4.9 ±0.1	81.2 ± 4	6.6 ±0.2	6.1 ±1
CMC1.5C	0.172	37.64 ±2	6.2 ±0.2	4.7 ±0.2	93.7 ± 3	6.8 ±0.3	3.9 ±2
CMC2A	0.178	38.90 ±3	5.0 ±0.4	4.8 ±0.2	95.0 ± 2	7.6 ±0.6	5.3 ±1
CMC2B	0.184	40.64 ±1	4.8 ±0.5	4.9 ±0.1	84.7 ± 4	7.0 ±0.3	8.6 ±3
CMC2C	0.184	39.14 ±1	4.3 ±0.2	4.6 ±0.2	92.7 ± 9	6.4 ±0.1	7.5 ±4

สร้างกลุ่มพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงขึ้นกับกลุ่มไฮดรอกซิลบนเส้นใยส่งผลให้กระดาษที่ผ่านการเคลือบมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น [8]

การดูดซึมน้ำเป็นการบ่งบอกความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของสารใด ๆ เข้าไปในเนื้อกระดาษ พบว่า กระดาษที่ไม่เคลือบมีความต้านทานการดูดซึมน้ำน้อยกว่ากระดาษที่เคลือบ เนื่องจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบมีโครงสร้างเป็นรูพรุนซึ่งจะแตกต่างจากกระดาษที่เคลือบที่ช่องว่างระหว่างเส้นใยจะถูกเคลือบด้วย CMC และสามารถแทรกซึมไปอยู่ช่องว่างระหว่างเส้นใย ทำให้ปริมาณของช่องว่างระหว่างเส้นใยลดลง [7]

ค่าความมึนขาวเป็นสมบัติด้านทัศนศาสตร์อย่างหนึ่ง กระดาษเคลือบผิวซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะของผิวกระดาษที่สะท้อนแสง ณ มุมที่กำหนด ซึ่งความมึน

ขาวเป็นความพอใจของผู้ใช้งานหากกระดาษมีค่าความมึนขาวดีก็อาจจะส่งผลให้การพิมพ์ภาพหรือลักษณะต่าง ๆ ในงานดีไปด้วย [9] โดยผลการทดลองพบว่า โดยเฉลี่ยกระดาษที่เคลือบมีค่าความมึนขาวเพิ่มขึ้น กระดาษที่เคลือบ CMC ความเข้มข้น 2% (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 0.5 % (w/v) มีค่าความมึนขาวสูงสุด

ปริมาณความชื้นของกระดาษถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากที่จะส่งผลต่อสมบัติทางกลของกระดาษที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง กระดาษที่เคลือบมีความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยกระดาษที่มีปริมาณความชื้นสูงที่สุดคือ กระดาษที่เคลือบ CMC ความเข้มข้น 2 % (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 0.75 % (w/v) และกระดาษที่มีปริมาณความชื้นต่ำสุดคือ กระดาษที่



เคลือบ CMC ความเข้มข้น 1% (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 1% (w/v) ทั้งนี้ค่าปริมาณความชื้นจะมีผลโดยตรงกับแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยที่เปลี่ยนแปลงไปเกิดการยึดและหดตัวของกระดาษ โดยกระดาษที่มีปริมาณความชื้นในกระดาษลดลงหรือต่ำจะส่งผลต่อสมบัติทางด้านความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงดันทะลุที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันการยึดตัวของกระดาษจะลดลง ในทางกลับกันเมื่อกระดาษมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นสมบัติทางด้านความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงดันทะลุจะลดลง แต่การยึดตัวของกระดาษจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามกระดาษที่เคลือบและกระดาษที่ไม่เคลือบมีค่าปริมาณความชื้นของกระดาษทั้งหมดไม่เกินจากค่ามาตรฐานคือ ร้อยละ 10

3.2 สมบัติด้านการพิมพ์

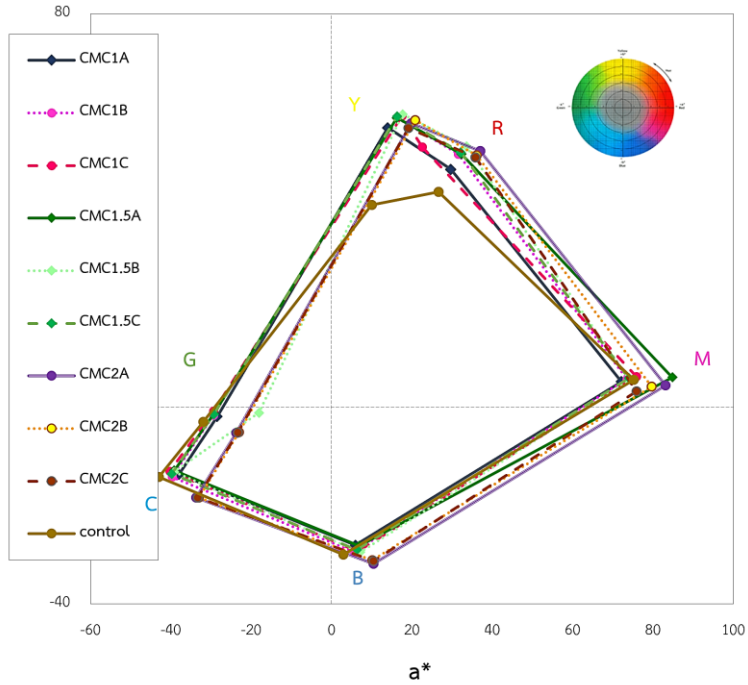
3.2.1 ค่าสี ความแตกต่างสี ขอบเขตสี และค่าความดำ

เมื่อวัดค่าสีของสารเคลือบบนกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่า L^* เท่ากับ 94.64 a^* เท่ากับ 1.84 และ b^* เท่ากับ -7.53 ซึ่งกระดาษจะมีค่าความสว่างที่ค่อนข้างสูงและกระดาษมีโทนสีออกไปทางสีน้ำเงิน เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างสี (ตารางที่ 3) กับกระดาษที่ผ่านการเคลือบ พบว่ากระดาษมีค่าความแตกต่างสีอยู่ในระดับที่มองไม่เห็นความแตกต่าง และเมื่อพิจารณาขอบเขตสีงานพิมพ์ที่พิมพ์ลงบนกระดาษที่เคลือบ จะมีขอบเขตสี สีเหลือง (Yellow, Y) สีแดง (Red, R) มากที่สุดตามลำดับ แต่มีขอบเขตสีน้ำเงิน (Blue, B) สีเขียว (Green, G)

ที่น้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบจะให้ขอบเขตสีน้ำเงินมากที่สุด และมีขอบเขตสี ของสีเหลือง (Y) สีแดง (R) น้อยที่สุด เนื่องจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบมีสารฟอกที่มีสีน้ำเงินทำให้ดูดกลืนสีเหลือง (Y) สีแดง (R) และสะท้อนสีน้ำเงิน (B) ออกมาและเมื่อเปรียบเทียบงานพิมพ์ทั้งหมด พบว่า กระดาษที่เคลือบ CMC ความเข้มข้น 2% (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 0.5 % (w/v) มีขอบเขตสีกว้างที่สุด อาจเกิดจากปริมาณสารที่เข้มข้นเมื่อปาดลงบนกระดาษ นำไปทำแห้งและผ่านกระบวนการรีด ทำให้กระดาษมีสีเหลือง (Y) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเมื่อนำไปพิมพ์ จึงให้ขอบเขตสีเหลือง (Y) สีแดง (R) มากที่สุด ดังรูปที่ 1

ค่าความดำ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง พบว่า กระดาษที่ผ่านการเคลือบจะให้ค่าความดำของงานพิมพ์ที่เพิ่มขึ้นในสีม่วงแดง (Magenta, M) สีเหลือง (Yellow, Y) และสีดำ (Black, K) ในส่วนของสีน้ำเงินเขียว (Cyan, C) จะมีค่าความดำน้อยกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ ทั้งนี้เนื่องจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบจะมีสีไปในโทนสีน้ำเงินที่อาจจะเป็นผลมาจากกระดาษมีการเติมสารฟอกขาว (Optical Brightening Agents, OBA) ลงไปในเนื้อกระดาษที่ทำให้กระดาษดูขาวสว่างมากยิ่งขึ้นจึงแสดงสีในโทนสีน้ำเงินเขียว (C) ได้ดี [10]

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของกระดาษที่เคลือบและไม่เคลือบ ลักษณะของพื้นผิวมีความแตกต่างกันโดยกระดาษที่เคลือบจะเงาและเรียบ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขอบเขตสีงานพิมพ์บนกระดาษ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพ (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) กระดาษที่เคลือบ



ตารางที่ 3 ค่าสี ค่าความดำและค่าความแตกต่างสี

กระดาษทดสอบ	C	M	Y	K	L*	a*	b*	Delta E
Control	1.01	1.01	1.11	1.14	94.64	1.84	-7.53	0.00
CMC1A	0.81	1.01	1.17	1.40	94.14	2.05	-8.31	0.95
CMC1B	0.80	1.07	1.01	1.41	94.19	1.98	-8.24	0.85
CMC1C	0.88	1.06	1.03	1.40	94.38	1.93	-8.29	0.81
CMC1.5A	0.90	1.06	1.03	1.40	94.42	2.02	-8.32	0.84
CMC1.5B	0.84	1.06	1.02	1.39	94.23	2.11	-8.50	1.08
CMC1.5C	0.79	1.06	1.20	1.39	94.24	2.11	-8.91	1.46
CMC2A	0.68	1.07	1.06	1.37	93.92	2.02	-8.14	0.96
CMC2B	0.88	1.08	1.04	1.37	94.61	1.99	-8.17	0.66
CMC2C	0.87	1.04	0.97	1.39	94.08	2.08	-8.38	1.05

3.2.2 รายละเอียดงานพิมพ์บนกระดาษ

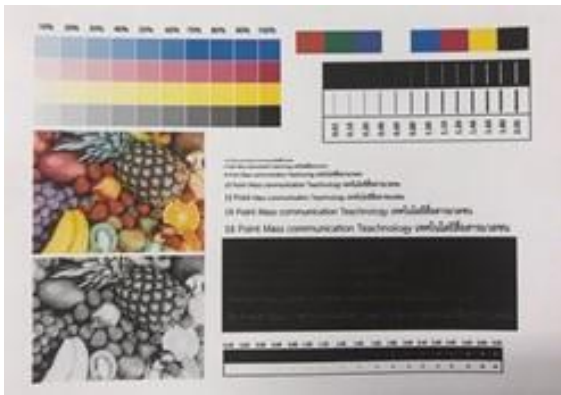
การเก็บรายละเอียดของแบบทดสอบงานพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยระบบการพิมพ์พ่นหมึก (Inkjet Printing) ที่ประกอบไปด้วย ตัวอักษร (Text size) จุด (Dot) เส้น (Line) ทั้งแบบ โพสิทีฟ (Positive) และเนกาทีฟ (Negative) พบว่า กระดาษที่ไม่เคลือบสามารถเก็บรายละเอียดของขนาดตัวอักษรที่เล็กที่สุดแบบโพสิทีฟ ได้ตั้งแต่ขนาด 12 พ้อยท์ และตัวอักษรแบบเนกาทีฟ ได้ตั้งแต่ขนาด 16 พ้อยท์ รายละเอียดของจุดที่เล็กที่สุดแบบโพสิทีฟ ได้ตั้งแต่ 1.10 พ้อยท์ และแบบเนกาทีฟ ได้ตั้งแต่ 1.60 พ้อยท์ และรายละเอียดขนาดของเส้นที่เล็กที่สุดแบบโพสิทีฟ ได้ตั้งแต่ 0.40 พ้อยท์ และแบบเนกาทีฟ ได้ตั้งแต่ 0.80 พ้อยท์

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระดาษที่เคลือบพบว่า กระดาษที่เคลือบสามารถเก็บรายละเอียดของ ตัวอักษร จุด และเส้น ทั้งแบบโพสิทีฟ และแบบเนกาทีฟ ได้ดีกว่า โดยกระดาษที่เคลือบ CMC ความเข้มข้น 1% (w/v) กลีเซอรอล ความเข้มข้น 0.5 % (w/v) เป็นสูตรที่สามารถเก็บรายละเอียดได้ดีที่สุด ดังตารางที่ 4 และเมื่อพิจารณารูปภาพที่เป็นภาพสีและภาพขาวดำ พบว่า กระดาษที่เคลือบนั้นให้ความคมชัดของภาพและสีที่ สบายกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ ดังรูปที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจาก กระดาษที่ถูกเคลือบนั้นจะเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่ผิวของกระดาษเมื่อได้รับหมึกพิมพ์ซึ่งเป็นหมึกพิมพ์เหลว ไม่สามารถแทรกซึมลงไปเนื้อกระดาษได้เมื่อเกิดการแห้งตัวจึงยึดติดอยู่บนผิวของกระดาษจึงสามารถแสดงสีนั้นได้อย่างสวยงาม

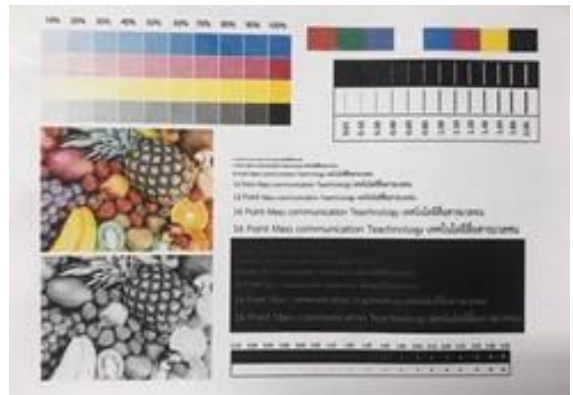


ตารางที่ 4 การเก็บรายละเอียดของงานพิมพ์

กระดาษ	Text size (Point)		Dot size (Point)		Line size (Point)	
	Positive	Negative	Positive	Negative	Positive	Negative
Control	12.00	16.00	1.10	1.60	0.40	0.80
CMC1A	10.00	14.00	1.00	1.20	0.20	0.40
CMC1B	10.00	14.00	1.00	1.20	0.20	0.60
CMC1C	12.00	14.00	1.00	1.20	0.20	0.80
CMC1.5A	12.00	14.00	0.80	1.10	0.20	0.60
CMC1.5B	12.00	14.00	1.00	1.20	0.20	0.60
CMC1.5C	12.00	14.00	1.00	1.20	0.20	0.80
CMC2A	10.00	14.00	1.00	1.20	0.40	0.80
CMC2B	12.00	14.00	0.80	1.20	0.40	0.80
CMC2C	12.00	14.00	0.80	1.10	0.40	0.80



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 งานพิมพ์แบบทดสอบ (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) กระดาษที่เคลือบ



3.3 แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งาน

จากผลการวิจัยจะพบว่า การเคลือบกระดาษด้วย CMC และ กลีเซอรอล จะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ดีขึ้น อาทิเช่น สมบัติทางด้าน การพิมพ์ สมบัติเชิงกล และ สมบัติทางด้าน การสกัดกั้น การซึมผ่าน ทั้งนี้ กระดาษที่ผ่านการเคลือบสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับ งานประเภทบรรจุภัณฑ์กระดาษห่อ กระดาษสำหรับ ตำนทานการดูดซึม น้ำ และวัสดุที่ใช้เคลือบเป็นการใช้ วัสดุทางชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทั้งนี้ กระดาษเคลือบยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อ ปรับปรุงประสิทธิภาพทางด้าน การใช้งานที่มีความ เหมาะสมกับการนำไปใช้งานประเภทต่าง ๆ

4. บทสรุป

ในการศึกษานี้ได้ทดลองการเคลือบกระดาษอาร์ต การ์ดที่น้ำหนักกระดาษ 150 กรัมต่อตารางเมตรด้วย คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร่วมกับกลีเซอรอลโดยเปลี่ยน ความเข้มข้นของตัวแปรละ 3 ระดับ จากนั้นเคลือบลง บนกระดาษด้วยบาร์โค้ดเตอร์เบอร์ 4 ทดสอบสมบัติ ของกระดาษ และสมบัติทางด้าน การพิมพ์ จากผลการ ทดลองสารเคลือบชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ใช้ เป็นสารเติมแต่งในการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับ กระดาษซึ่งเป็นกลุ่มไฮดรอกซิลโดยธรรมชาติทำให้ สามารถผสมผสานเชื่อมระหว่างเส้นใยได้ดี สามารถ ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดัน ทะลุ และการดูดซึม น้ำของกระดาษ รวมทั้งเมื่อนำไป ทดลองพิมพ์ยังส่งผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การพัฒนางานสารเคลือบทางชีวภาพ ยังคงต้องมีการปรับปรุงพัฒนาประสิทธิภาพในการผลิต และฟังก์ชันพิเศษรวมทั้งฐานข้อมูลที่สำคัญเพื่อพัฒนา นวัตกรรมและผลิตภัณฑ์กระดาษต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ หลักสูตรเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชภัฏนครราชสีมา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] https://xn--12cf0dj0aaufr9l0ai2m6ab4p.blogspot.com/2011/04/blog-post_3.html. (Accessed on 15 March 2022)
- [2] <http://otop.dss.go.th/index.php/home/26-interesting-articles/143-2017-07-31-03-26-10> (Accessed on 15 March 2022)
- [3] H. Hamada, and D.W. Bousfield, Nano fibrillated cellulose as a coating agent to improve print quality of synthetic fiber sheets, Tappi Journal, 2010, 9(11), 25-29.
- [4] N. Dussadeeworarak, P. Silakoo, A. Kaewilai, and T. Thaweechai, Coating of nano-film Cr₂O₃ on welded 304L stainless steel and its surface resistance properties, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 113-123.
- [5] K. Dimic-Misic, C. Ridgway, T. Maloney, J. Paltakari, and P. Gane, Influence on porestructure of micro/nanofibrillar cellulose in pigmented coating formulations, Transport in Porous Media, 2014, 103(2), 155-179.



- [6] I. González, S Boufi, M.A. Pèlach, M. Alcalà, F. Vilaseca, and P. Mutjéa, Nanofibrillated cellulose as paper additive in Eucalyptus pulps, *BioResources*, 2012, 7(4), 5167–5180.
- [7] Y. He, H. Li, X. Fei and L. Peng, Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications, *Carbohydrate Polymers*, 2021, 252, 117156.
- [8] A. li, D. xu, L. Luo, Y. Zhou, W. Yan, X. Leng, D. Dai, Y. Zhou, H. Ahmad, J. Rao, and M. Fan, Overview of nanocellulose as additives in paper processing and paper products, *Nanotechnology Review*, 2021, 10(1), 264–281.
- [9] R. Wattanawong, *Printing materials*, 1st Ed, Sukhothai Thammathirat Open University Press, Nonthaburi, Thailand, 2011.
- [10] C. Yu, *The Effect of Optical Brightening Agent (OBA) in Paper and Illumination Intensity on Perceptibility of Printed Colors*, Thesis, Rochester Institute of Technology, USA, 2014.



การประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกสำหรับการพยากรณ์ราคาพืชไร่ของประเทศไทย

ธนกร สุทธิสนธ์*

สาขาวิชาสถิติประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thanakon.s@ubru.ac.th

วันที่รับบทความ: 20 เมษายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 17 ตุลาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 19 ตุลาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 23 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกตัวแบบการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพืชไร่ 3 ชนิด ได้แก่ ราคามันสำปะหลัง ราคข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ เก็บรวบรวมข้อมูลจากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2545 ถึงเดือน มกราคม พ.ศ. 2565 จำนวน 241 ค่า สร้างตัวแบบการพยากรณ์ 3 วิธี คือ ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network Model: ANN) ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Long Short-Term Memory: LSTM) และตัวแบบผสม (Hybrid Model) เปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบด้วยเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพ 3 เกณฑ์ คือ ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) รากของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) และร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percent Error: MAPE) ผลการวิจัยพบว่า ตัวแบบผสมมีประสิทธิภาพการพยากรณ์ดีกว่าตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมและตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกในทุกชุดข้อมูลและทุกเกณฑ์การวัดประสิทธิภาพการพยากรณ์ สรุปได้ว่า ตัวแบบผสมมีความเหมาะสมในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด

คำสำคัญ: ราคาพืชไร่; ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก; ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียม; ตัวแบบผสม

Application of a Long Short - Term Memory Deep Natural Network Model for Field Crops Price Forecasting in Thailand

Thanakon Sutthison*

Program of Applied Statistics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: thanakon.s@ubru.ac.th

Received: 20 April 2022; Revised: 17 October 2022; Accepted: 19 October 2022

Online Published: 23 December 2022

Abstract: The objective of this research was to select a forecasting model suitable for the time series data of three sets of field crop prices, namely cassava, corn and paddy rice prices. Two-hundred and forty-one values were collected from the website of the Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives from January 2002 to January 2022. Three forecasting models were constructed: an artificial neural network model (ANN), a long short-term memory (LSTM) deep neural network model and a hybrid model. The models' accuracy was compared by three performance evaluations: mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and mean absolute percent error (MAPE). The results showed that the hybrid model provided better forecast accuracy than the ANN model and the LSTM model in all data sets and all forecasting performance criteria. It can be concluded that the hybrid model was suitable for forecasting the time series data of three sets of field crop prices.

Keywords: Field crops prices; Long short-term memory (LSTM); Artificial neural network model (ANN); Hybrid model



1. บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิประเทศที่เอื้อต่อการทำเกษตร ทำให้ประชากรส่วนใหญ่ในประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรม [1] ปัจจุบันประเทศไทยมีจำนวนประชากรในภาคการเกษตรมากถึง 10.52 ล้านคน [2] และภาคการเกษตรสามารถสร้างรายได้ต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศประมาณร้อยละ 8.631 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมทั้งประเทศ [3] การผลิตสินค้าทางการเกษตรของประเทศไทย แบ่งเป็น 5 ชนิด [4] ได้แก่ (1) พืชไร่ ได้แก่ ข้าวมันสำปะหลัง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (2) พืชสวน ได้แก่ ลำไย ยางพารา ปาล์มน้ำมัน ทูเรียน กาแฟ เป็นต้น (3) พืชผัก ได้แก่ หอมหัวใหญ่ กระเทียม หอมแดง หน่อไม้ฝรั่ง เป็นต้น (4) ประมง ได้แก่ ปลานิล ปลาดุก กุ้งทะเลเพาะเลี้ยง และ (5) ไม้ดอก เช่น กล้วยไม้ ตามลำดับ จากการพิจารณาข้อมูลการผลิตสินค้าทางการเกษตรดังกล่าวข้างต้น พบว่า ประชากรไทยให้ความสำคัญในการผลิตสินค้าทางการเกษตรพืชไร่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการผลิตสินค้าทางการเกษตรอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกพืชไร่จำนวนมาก โดยมีพื้นที่เพาะปลูกพืชไร่ที่สำคัญ ได้แก่ ข้าวประมาณ 56,832,000 ไร่ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ประมาณ 6,881,000 ไร่ มันสำปะหลัง ประมาณ 8,918,000 ไร่ [5] จากพื้นที่เพาะปลูกจำนวนมาก การหามาตรการควบคุมการผลิตเพื่อให้สอดคล้องกับอุปสงค์และอุปทานมีความสำคัญอย่างยิ่ง หากผลผลิตออกมามากเกินความต้องการอาจส่งผลทำให้ราคาสินค้าตกต่ำ และหากผลผลิตออกมาน้อยอาจส่งผลทำให้สินค้าขาดแคลนไม่เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าราคาผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่เพาะปลูกพืชไร่ [6] ดังนั้น การทราบราคาผลผลิตทางการเกษตรล่วงหน้าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการเป็นสารสนเทศที่สำคัญ สำหรับผู้ผลิตและผู้ส่งออกสามารถใช้ประกอบการวางแผนในการตัดสินใจกับเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ [7] การคาดการณ์ราคาผลผลิตทางการเกษตรมีหลายวิธี วิธีการพยากรณ์เชิงสถิติเป็นวิธีหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ราคาผลผลิตทางการเกษตรในปัจจุบัน [8-10] จากการศึกษา พบว่าข้อมูลอนุกรมเวลาราคาผลผลิตทางการเกษตรรายเดือนมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไปและมีความไม่แน่นอนแทรกอยู่ [4] หากทำการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยวิธีการพยากรณ์อย่างง่าย เช่น วิธีการปรับให้เรียบ วิธีบ็อกซ์ – เจนกินส์ [6, 7] และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม [11] อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจำนวนมากพยายามเสนอตัวแบบการพยากรณ์อนุกรมเวลาให้มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูง ปัจจุบันมีการนำเทคนิคการพยากรณ์เชิงลึก (Deep Learning) มาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์อนุกรมเวลาเนื่องจากมีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับตัวแบบดั้งเดิม [12], [13] มีนักวิจัยบางท่านประยุกต์ใช้ตัวแบบการพยากรณ์แบบผสม (Hybrid Forecasting) โดยนำเอาเทคนิควิธีการแยกองค์ประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition: EMD) เพื่อลดความผันผวนของข้อมูลอนุกรมเวลาก่อนนำไปพยากรณ์ด้วยเทคนิควิธีการพยากรณ์



โครงข่ายประสาทเทียมแบบลึก (Long Short Term Memory Deep Learning: LSTM) พบว่า ค่าพยากรณ์มีความแม่นยำสูง [14, 15] ปัจจุบันมีการนำแนวคิดดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์อนุกรมเวลาหลากหลาย เช่น การพยากรณ์ราคาหุ้น [16] การพยากรณ์การฉายรังสีแสงอาทิตย์ [17] การพยากรณ์การผลิตน้ำมันดิบ [18, 19] การพยากรณ์ความเร็วลม [20] การพยากรณ์ข้อมูลทางการเงิน [21] เป็นต้น

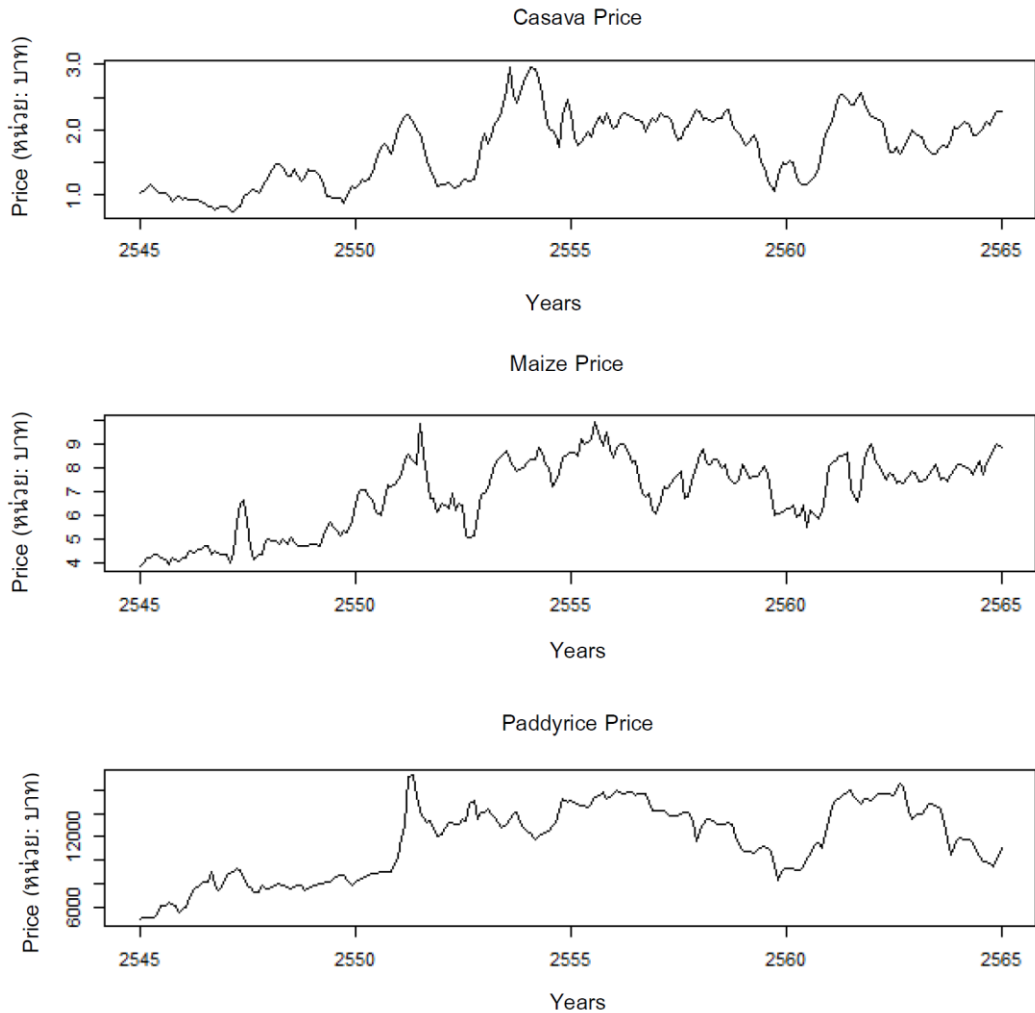
จากข้อค้นพบดังกล่าวข้างต้น พบว่า การพยากรณ์ราคาผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทย ส่วนใหญ่ ใช้วิธีการพยากรณ์พื้นฐานและข้อมูลมีความไม่แน่นอนแทรกอยู่ โดยเฉพาะราคาพืชไร่ ทำให้ค่าพยากรณ์มีความคลาดเคลื่อนสูง จากช่องว่างการวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเป็นสารสนเทศให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำไปใช้ในการตัดสินใจกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอนาคต ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงนำเสนอตัวแบบผสมโดยประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการแยกองค์ประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาเชิงประจักษ์ร่วมกับเทคนิควิธีการพยากรณ์โครงข่ายประสาทเทียมแบบลึกพยากรณ์ราคาผลผลิตพืชไร่ของประเทศไทย เนื่องจากเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำสูง การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มุ่งศึกษาเฉพาะราคาพืชไร่ 3 ชนิด ประกอบด้วย ราคามันสำปะหลัง ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ เหตุผลที่เลือกพยากรณ์ราคาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด เพราะเป็นพืชเศรษฐกิจประกอบกับมีพื้นที่เพาะปลูกจำนวนมาก หากสามารถสร้างตัวแบบการพยากรณ์ที่แม่นยำจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงาน

ที่เกี่ยวข้อง สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนเพื่อประกอบการกำหนดแนวทางการบริหารจัดการราคาพืชไร่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพืชไร่ จำนวน 3 ชุด ได้แก่ ราคามันสำปะหลัง (Casava Price) ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Maize Price) และราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ (Paddyrice Price) ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2545 ถึงเดือน มกราคม พ.ศ. 2565 ที่เผยแพร่ในเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [5] จำนวน 241 ค่า แสดงในรูปที่ 1 ผู้วิจัยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ข้อมูลฝึกฝน (Training Dataset) ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2545 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 216 ค่า สำหรับสร้างตัวแบบ ชุดที่ 2 ข้อมูลการทดสอบ (Testing Dataset) ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนมกราคม 2565 จำนวน 25 ค่า การแบ่งข้อมูลดังกล่าวใช้เกณฑ์ร้อยละ 90 และร้อยละ 10 [22] เนื่องจากเก็บข้อมูลเป็นรายเดือนจำนวนคาบเวลาใน 1 ฤดูกาลเท่ากับ 12 เดือน ดังนั้นจึงแบ่งข้อมูลตามสัดส่วนดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ครอบคลุมจำนวนคาบของฤดูกาลซึ่งมีผลต่อการทำนายของตัวแบบการพยากรณ์ทางสถิติ โดยการสร้างตัวแบบ มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพืชไร่ จำนวน 3 ชนิด ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2545 ถึงเดือน มกราคม พ.ศ. 2565

2.2 วิธีการแยกองค์ประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาเชิงประจักษ์ (EMD)

วิธี EMD เป็นวิธีการแยกความถี่ของข้อมูลอนุกรมเวลาที่ไม่มีเชิงเส้นตรงและมีลักษณะเคลื่อนไหวไม่คงที่ (Non-Stationary) ออกจากกัน และมีการนำมาใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา

อย่างแพร่หลาย [14, 15] นำเสนอโดย Huang [23] มีหลักการ คือ จะทำการลดสัญญาณแกว่งไวของข้อมูล (Fast Oscillation) โดยแยกเป็นฟังก์ชันภายใน (Intrinsic Mode Function: IMF) ด้วยเงื่อนไข ดังนี้ (1) จำนวนจุดปลายสุด (Extrema Points) ประกอบด้วยจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดและจำนวนจุดตัด



แกนศูนย์ต้องมีค่าเท่ากับหรือมีค่าต่างกันไม่เกินหนึ่ง (2) ณ จุดใด ๆ ของสัญญาณค่าเฉลี่ยขอบบนและขอบล่างจะมีค่าเท่ากับศูนย์ กระบวนการทำงานเพื่อสกัดชุดฟังก์ชันภายใน (IMF) ของวิธี EMD ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. การตรวจจับจุดปลายสุดของสัญญาณ (Extrema Detection) โดยการหาจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของแต่ละช่วงสัญญาณย่อย

2. การประมาณค่าขอบเขตพื้นผิว (Surface Interpolation) ของสัญญาณโดยการหาค่าประมาณสัญญาณขอบบนและสัญญาณขอบล่างและคำนวณหาสัญญาณเฉลี่ยตามสมการที่ (1) จากนั้นนำสัญญาณต้นฉบับลบออกด้วยสัญญาณเฉลี่ยจะได้สัญญาณผลลัพธ์ ขั้นตอนต่อไปตรวจสอบว่าสัญญาณผลลัพธ์นั้นเป็นฟังก์ชันภายใน (IMF) หรือไม่ ถ้าผลปรากฏว่าสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นฟังก์ชันภายใน (IMF) ให้แทนที่สัญญาณต้นฉบับด้วยสัญญาณผลลัพธ์แล้วทำซ้ำกระบวนการดังกล่าวข้างต้น หากสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้เป็นฟังก์ชันภายใน (IMF) ให้จัดเก็บสัญญาณผลลัพธ์นั้น จากนั้นทำการสกัดฟังก์ชันภายใน (IMF) ลำดับถัดไป สัญญาณต้นฉบับใหม่ที่ได้จากการนำสัญญาณต้นฉบับเดิมลบด้วยฟังก์ชันภายใน (IMF) แล้วทำกระบวนการข้างต้นซ้ำจนสัญญาณต้นฉบับเป็นสัญญาณฟังก์ชันเดียว

$$m(t) = \frac{e_{\max} + e_{\min}}{2} \quad (1)$$

เมื่อ $m(t)$ แทนสัญญาณเฉลี่ย e_{\max} , e_{\min} แทนสัญญาณขอบบนและสัญญาณขอบล่าง ซึ่งนำมาเขียนในรูปสมการได้ ดังสมการที่ (2)

2.3 ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

ตัวแบบ ANN เป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่จำลองขึ้นโดยอาศัยหลักการทำงานของสมองมนุษย์ เป็นเทคนิคการเรียนรู้โดยใช้เครื่อง (Machine Learning) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานจำแนกประเภทและการพยากรณ์ [18] การประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียมจะเกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อย (Node) เมื่อมีข้อมูลนำเข้า (Input Data) เข้ามายังโครงข่าย ข้อมูลนำเข้าแต่ละค่าจะถูกนำมาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) แล้วนำมารวมกันเพื่อส่งผ่านไปยังฟังก์ชันการแปลง (Transfer Function) หรือฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) และส่งข้อมูลผลลัพธ์ไปยังหน่วยประมวลผลย่อยถัดไป [24] โดยโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Multi - Layer Perceptron: MLP) จัดเป็นตัวแบบ ANN ที่นิยมใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา [25] โครงสร้างของตัวแบบมีทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ Input Layer, Hidden Layer และ Output Layer แต่ละชั้นจะประกอบด้วยโหนดที่มีจำนวนต่างกัน และโหนดในชั้น Input Layer จะเชื่อมไปข้างหน้า กับทุกโหนดในชั้นถัดไปตามลำดับจนถึง Output Layer ตัวแบบของ ANN [26] แสดงดังสมการที่ (3)

$$x(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) + r_N(t) \quad (2)$$

เมื่อ $x(t)$ แทน สัญญาณต้นฉบับ $h_i(t)$; $i=1, 2, 3, \dots, n$ เป็นชุดฟังก์ชันภายใน (IMFs) และ $r_N(t)$ เป็นส่วนเหลือ (Residual)

$$y_t = \alpha + \sum_{j=1}^n \alpha_j f\left(\sum_{i=1}^m \beta_{ij} y_{t-1} + \beta_j\right) + \varepsilon_t \quad (3)$$



เมื่อ y_t คือ ค่าสังเกตของข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา t , α คือ เวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างหน่วยประมวลผลย่อยจำนวน n หน่วยใน Hidden Layer กับหน่วยประมวลผลย่อยใน Output Layer, β_{ij} คือ ค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างหน่วยประมวลผลย่อยแต่ละหน่วยใน Input Layer ซึ่งมีทั้งหมด m หน่วย กับหน่วยประมวลผลย่อยใน Hidden Layer โดยที่ $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; f$ คือ ฟังก์ชันกระตุ้นงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid Logistic Function โดยมีสมการ ดังนี้ $f(x) = 1 / (1 + e^{-x})$ เนื่องจากทดลองใช้แล้วให้ค่าความแม่นยำกว่าฟังก์ชันกระตุ้นอื่น ๆ และ ε_t คือ ความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t

2.4 ตัวแบบ Long Short-Term Memory (LSTM)

ตัวแบบ LSTM คือ โครงข่ายประสาทเทียมที่มีความสามารถด้านหน่วยความจำซึ่งเหมาะสำหรับการประมวลผลและคาดการณ์เหตุการณ์สำคัญที่มีช่วงเวลาค่อนข้างยาว [27] ซึ่งพัฒนาจากตัวแบบ Recurrent Neural Network (RNN) โดยมีหลักการทำงาน คือ สามารถเก็บ “สถานะ” หรือข้อมูลของแต่ละโหนดเอาไว้ เพื่อที่เวลาย้อนกลับไปที่จุดจะได้ทราบถึงที่มาของข้อมูลค่าดังกล่าวว่าเดิมเป็นค่าอะไร เทคนิค LSTM คือ มีฟังก์ชันพิเศษที่มีหน้าที่เสมือน “ประตู (Gate)” ที่คอยควบคุมข้อมูลที่จะเข้ามาในแต่ละโหนด ประกอบด้วย Forget Gate Layer, Input Gate Layer และ Output Gate Layer [14] แสดงดังรูปที่ 2

ขั้นตอนของ LSTM สามารถดำเนินการได้ดังนี้

1. Forget Gate Layer คือ Gate มีหน้าที่ในการกำหนดว่าข้อมูลที่เข้ามาใน Cell State ควรจะถูกเก็บไว้หรือควรที่จะทิ้งไป ข้อมูลที่ถูกตัดสินใจควรเก็บไว้

จะถูกประเมินจากข้อมูล Input ที่เข้ามาในโหนดนั้น ๆ รวมกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของโหนดก่อนหน้าผ่านฟังก์ชัน Sigmoid ดังสมการที่ (4)

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (4)$$

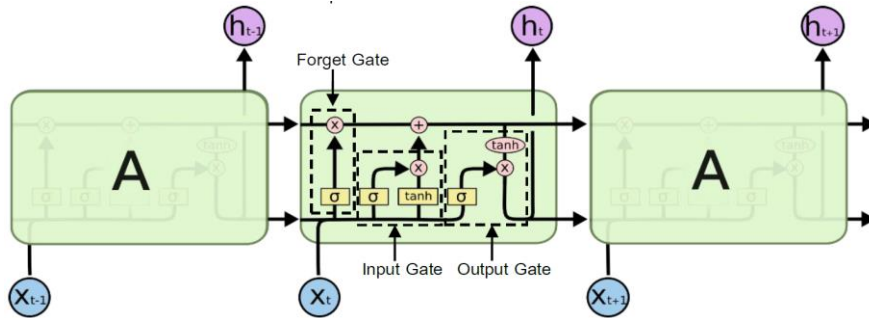
เมื่อ f_t คือ Forget Gate (มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1), σ คือ ฟังก์ชัน Sigmoid, W_f คือ ค่าน้ำหนักของ Matrices, h_{t-1} คือ ค่า Output ของ Cell State ก่อนหน้า, x_t คือ ค่า Input ที่เข้ามาใน Cell State ณ เวลา t และ b_f คือ ค่า Bias

2. Input Gate Layer คือ Gate มีหน้าที่รับข้อมูล Input เข้ามาใหม่แล้วจึงทำการบันทึกหรือเขียนข้อมูลลงไปในแต่ละโหนด การทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ตรวจสอบการ Update Cell State เมื่อมีการรับข้อมูล Input โดยฟังก์ชัน Sigmoid ที่เป็นตัวควบคุมจะเรียกใช้ Input Gate เพื่อเลือกจะให้ Update Cell State หรือไม่ 2) ถ้า Input Gate เลือกทำการ Update Cell State ฟังก์ชัน Tanh จะทำการสร้าง Candidate Values (\tilde{C}_t) ขึ้นมาใน State ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (5)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (6)$$

เมื่อ i_t คือ Input Gate, σ คือ ฟังก์ชัน Sigmoid, \tilde{C}_t คือ ค่า Candidate ของ Cell State ที่เวลา t , \tanh คือ ฟังก์ชัน Tanh, W_i, W_c คือ ค่าน้ำหนักของ Matrices, h_{t-1} คือ ค่า Output ของ Cell State ก่อนหน้า, x_t คือ ค่า Input ที่เข้ามาใน Cell State ณ เวลา t , b_i, b_c คือ ค่า Bias



รูปที่ 2 โครงสร้างการทำงานของตัวแบบ LSTM [28]

3. Output Gate Layer คือ Gate มีหน้าที่เตรียมทำการส่งออกข้อมูล (Output Data) ข้อมูลที่จะทำการ Output โดยดูจาก Cell State ที่ผ่านกระบวนการคำนวณต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว โดยฟังก์ชัน Sigmoid จะเป็นตัวเลือกว่าข้อมูลส่วนไหนใน Cell State ที่จะถูก Output จากนั้นนำค่า Cell State เข้าฟังก์ชัน Tanh (ค่าที่ได้มีค่าเป็น 1 หรือ -1) แล้วนำค่าที่ได้จากฟังก์ชัน Tanh มาทำการคำนวณกับค่า Output ที่ได้จาก Sigmoid Gate ได้ค่า Output ดังสมการที่ (7)

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (7)$$

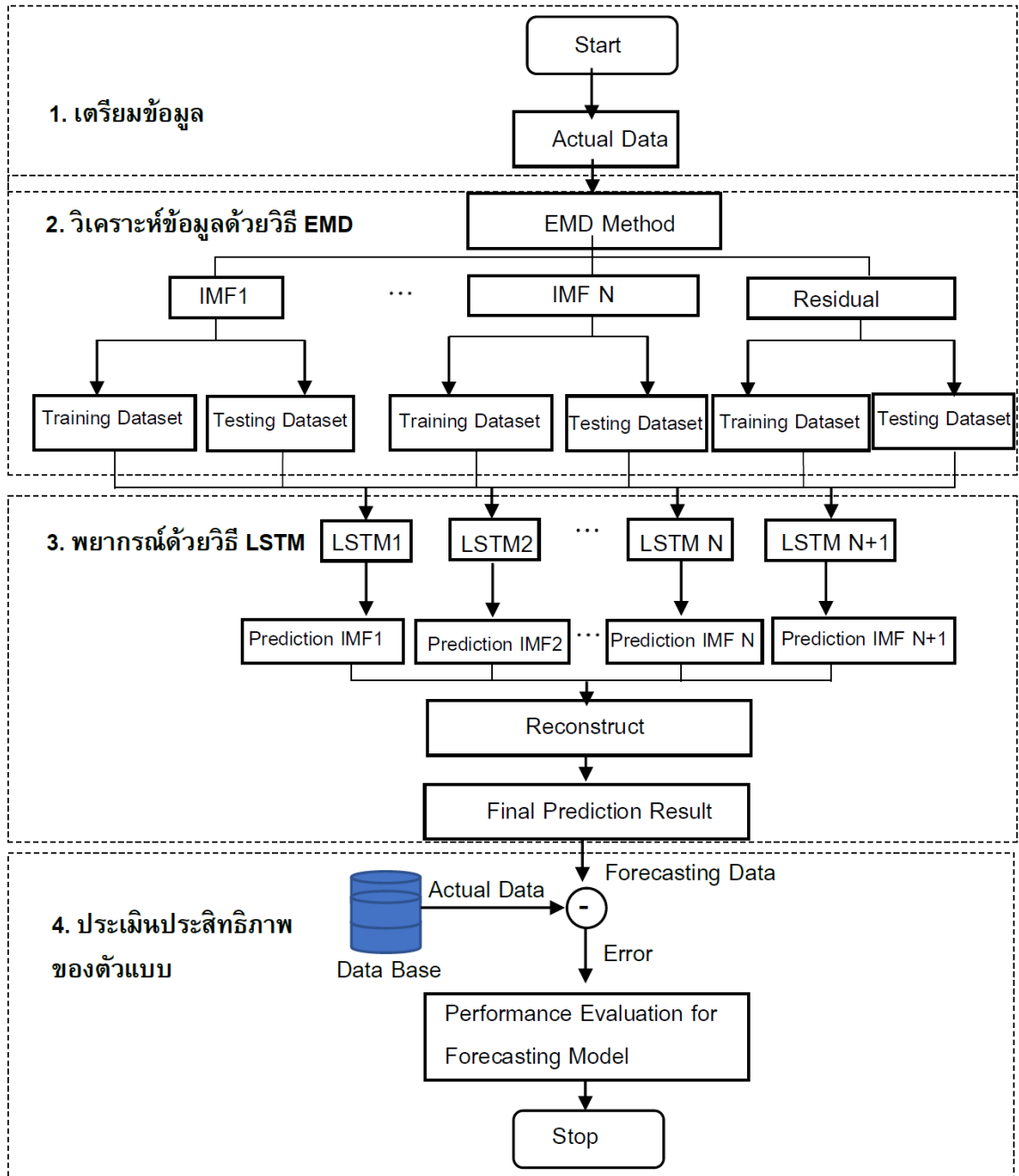
เมื่อ o_t คือ Output Gate, σ คือ ฟังก์ชัน Sigmoid, W_o คือ ค่านำหนักของ Matrices, h_{t-1} คือ ค่า Output ของ Cell State ก่อนหน้า (ที่ Time Stamp $t-1$), x_t คือ ค่า Input ที่เข้ามาใน Cell State ณ เวลา t , b_o คือ ค่า Bias

2.5 ตัวแบบผสม (Hybrid Model)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยวิธี EMD เป็นวิธีการแยกข้อมูลอนุกรมเวลาออกเป็น ส่วน ๆ เพื่อลดความถี่และสัญญาณแกว่งไวของข้อมูล (Fast Oscillation) โดยแยกออกเป็น ฟังก์ชันภายใน (Intrinsic Mode Function: IMF) การสร้างตัวแบบ

ผสมจะนำองค์ประกอบที่แยกได้จากวิธี EMD มาทำการพยากรณ์ด้วยวิธี LSTM และนำค่าพยากรณ์มารวมกันในขั้นตอนสุดท้าย เรียกตัวแบบดังกล่าวว่า ตัวแบบ HybridEMD-LSTM มีขั้นตอนและวิธีการสร้างตัวแบบ แสดงดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 สามารถอธิบายรายละเอียดของตัวแบบ HybridEMD -LSTM ได้ดังนี้ (1) เตรียมข้อมูลประกอบด้วยข้อมูลอนุกรมเวลาราคาฟิวเจอร์ 3 ชุด (2) วิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาราคาฟิวเจอร์ทั้ง 3 ชุด ด้วยวิธี EMD เพื่อแยกองค์ประกอบของอนุกรมเวลาดันฉบับให้อยู่ในรูปของชุดฟังก์ชันภายใน (Intrinsic Mode Functions: IMFs) และค่าความคลาดเคลื่อนแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ข้อมูลการเรียนรู้ (Training Dataset) และชุดที่ 2 ข้อมูลการทดสอบ (Testing Dataset) (3) นำองค์ประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาแต่ละส่วนจากขั้นตอนที่ 2 พยากรณ์ด้วยตัวแบบ LSTM (4) รวมค่าพยากรณ์จากขั้นตอนที่ 3 ได้ค่าพยากรณ์จากตัวแบบ HybridEMD-LSTM (5) คำนวณค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ ด้วยมาตรวัดประสิทธิภาพของตัวแบบการพยากรณ์ MAE, RMSE และ MAPE ตามลำดับ



รูปที่ 3 กระบวนการในการพัฒนาตัวแบบ HybridEMD-LSTM



2.6 เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ

การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ งานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 เกณฑ์ [27] ดังนี้

(1) ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) มีสูตรดังสมการที่ (8)

$$MAE = \sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t| / n \quad (8)$$

(2) รากของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) มีสูตรดังสมการที่ (9)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 / n} \quad (9)$$

(3) ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) มีสูตรดังสมการที่ (10)

$$MAPE = 100 \times \sum_{t=1}^n |1 - \hat{Y}_t / Y_t| / n \quad (10)$$

โดยที่ค่า MAE, RMSE และ MAPE มีค่าน้อยเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่า ตัวแบบมีประสิทธิภาพความแม่นยำสูง

ตารางที่ 1 ค่าสถิติพื้นฐานราคาพืชไร่ 3 ชนิด

รายการ	ข้อมูล	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่ามัธยฐาน	ค่าต่ำสุด	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ราคามันสำปะหลัง	All sample	241	1.701	2.960	1.780	0.740	0.532
	Training Dataset	216	1.673	2.960	1.780	0.740	0.551
(หน่วย: บาท/กก.)	Testing Dataset	25	1.945	2.290	1.940	1.620	0.193
ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	All sample	241	6.909	9.950	7.330	3.890	1.518
	Training Dataset	216	6.786	9.950	6.980	3.890	1.551
(หน่วย: บาท/กก.)	Testing Dataset	25	7.973	8.970	7.920	7.420	0.439
ราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ	All sample	241	7,827	13,259	7,827	4,579	1,667.590
	Training Dataset	216	7,750	13,259	7,750	4,579	1,729.277
(หน่วย : บาท/ตัน)	Testing Dataset	25	8,655	9,453	8,655	7,442	662.073

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์สถิติพื้นฐานราคาพืชไร่ 3 ชนิด

(1) ราคามันสำปะหลังรายเดือน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.701 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.532 บาทต่อกิโลกรัม มีค่าสูงสุด เท่ากับ 2.960 บาทต่อกิโลกรัม และค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.740 บาทต่อกิโลกรัม

(2) ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.909 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.518 บาทต่อกิโลกรัม มีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.950 บาทต่อกิโลกรัม และต่ำสุดเท่ากับ 3.890 ต่อ กิโลกรัม

(3) ราคาข้าวเปลือกหอมมะลิ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7,827 บาทต่อตัน มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1,667.590 บาทต่อตัน มีค่าสูงสุด เท่ากับ 13,259 บาทต่อตัน และค่าต่ำสุด เท่ากับ 4,579 บาทต่อตัน รายละเอียดดังตารางที่ 1



3.2 ผลการพยากรณ์ด้วยตัวแบบ ANN ตัวแบบ LSTM และตัวแบบ HybridEMD-LSTM

การพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพีซีซีทั้ง 3 ชุด ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเรียงลำดับแต่ละตัวแบบมีรายละเอียด ดังนี้

3.2.1 การกำหนดตัวแบบการพยากรณ์แบบ ANN ผู้วิจัยประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Multi - Layer Perceptron) ซึ่งโปรแกรมภาษาอาร์มีฟังก์ชัน MLP ซึ่งอยู่ใน Package “nnfor” สำหรับกำหนดข้อมูลนำเข้า (Input) และชั้นซ่อน (Hidden) และใช้ Sigmoid Logistic Function เป็น ฟังก์ชันกระตุ้น การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้ในครั้งนี้เป็นแบบแพร่กลับ (Backpropagation Learning) และทำการปรับปรุงองคกอลิเทียมด้วยฟังก์ชัน Levenberg- Marquardt เพื่อให้การปรับค่าน้ำหนักและค่าเอนเอียงในเส้นเชื่อมแต่ละชั้นของโครงข่ายให้มีความรวดเร็วและได้ค่าที่มีความเหมาะสม จากนั้นทำการปรับค่าผลรวมของนิวรอนในชั้นซ่อนด้วยฟังก์ชันถ้ายอน คือ ฟังก์ชันซิกมอยด์แบบโลจิสติกส์ (Sigmoid Logistic Function) มีผลลัพธ์อยู่ในช่วง [-1,1] มีอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) เท่ากับ 0.0001 จำนวนรอบในการฝึกฝนการเรียนรู้ (Epoch) สูงสุด 1,000 รอบ และใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) เป็นเกณฑ์ในการเลือกนิวรอนในชั้นซ่อนที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายการพยากรณ์ด้วย ตัวแบบ ANN จะใช้ข้อมูลชุดที่ 1 ข้อมูลฝึกฝน (Training Dataset) จำนวน 216 ค่าสังเกต สำหรับสร้างตัวแบบ และชุดที่ 2 ข้อมูลการทดสอบ (Testing Dataset) จำนวน 25 ค่าสังเกต

เพื่อให้ครอบคลุมจำนวนคาบของข้อมูลใน 1 ฤดูกาล ทำให้ตัวแบบมีความแกร่งและมีความแม่นยำในการพยากรณ์ การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบโครงสร้างสถาปัตยกรรมการเรียนรู้สำหรับตัวแบบ ANN ของข้อมูลแต่ละชุดดังนี้คือ ชุดที่ 1 ราคามันสำปะหลัง มี Number of Input Nodes เท่ากับ 17, Hidden Layer Node เท่ากับ 5 และ Output Nodes เท่ากับ 1 โดยมีค่า MSE เท่ากับ 0.0011 ชุดที่ 2 ราคาข้าวโพด มี Number of Input Nodes เท่ากับ 13, Hidden Layer Node เท่ากับ 5 และ Output Nodes เท่ากับ 1 โดยมีค่า MSE เท่ากับ 0.0674 ชุดที่ 3 ราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ ข้าวโพด มี Number of Input Nodes เท่ากับ 5, Hidden Layer Node เท่ากับ 5 และ Output Nodes เท่ากับ 1 โดยมีค่า MSE เท่ากับ 0.0489 ผลการพยากรณ์และค่าการตรวจสอบความแม่นยำของค่าพยากรณ์ทั้ง 3 ชุด แสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3

3.2.2 การพยากรณ์ด้วยตัวแบบ LSTM ผู้วิจัยประยุกต์ใช้โปรแกรมภาษาไพธอน โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ข้อมูลการเรียนรู้ (Training Dataset) และ ชุดที่ 2 ข้อมูลทดสอบ (Testing Dataset) จากนั้นแบ่งข้อมูลชุดที่ 1 ข้อมูลการเรียนรู้ และชุดข้อมูลการทดสอบออกเป็นข้อมูลที่ใช้ในการ Input และ Output ของแบบจำลอง LSTM โดยแปลงค่าชุดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของอาร์เรย์ 3 มิติ ได้แก่ Sample, Timesteps, Feature และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ Normalize โดยปรับค่าให้อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และนำข้อมูลไปสร้างตัวแบบ LSTM การพยากรณ์ด้วยตัวแบบ LSTM จะต้องมีการกำหนด Epochs Hidden Neuron และ Batch Size ที่เหมาะสม



งานวิจัยนี้กำหนด Epochs = 20, Batch Size = 1, Step = 1, Activation = Relu โดยกำหนดค่าของ Optimizer = Adam ทั้งสามชุดข้อมูล เนื่องจากทดลองใช้กับข้อมูล พบว่า มีค่าความแม่นยำมากที่สุด เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม นำค่าดังกล่าวมา กำหนดตัวแบบและพยากรณ์ล่วงหน้า เมื่อได้ค่าพยากรณ์ทำการแปลงค่ากลับให้มีหน่วยเหมือนกับข้อมูลจริง ผลการพยากรณ์และค่าการตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบ แสดงดังตารางที่ 2 และ 3

3.2.3 การพยากรณ์ด้วยตัวแบบ HybridEMD-LSTM ที่ผู้วิจัยประยุกต์ใช้โปรแกรมภาษาไพธอน และดำเนินการตามขั้นตอนการสร้างตัวแบบผสม โดยการเตรียมข้อมูลอนุกรมเวลาและทำการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพีซีไทร์ 3 ชุด ด้วยวิธี EMD เพื่อแยกองค์ประกอบอนุกรมเวลาดันฉบับให้อยู่ในรูปของชุดฟังก์ชันภายใน (Intrinsic Mode Functions : IMFs) และค่าความคลาดเคลื่อน โดยจะแสดงตัวอย่าง

การวิเคราะห์เพียง 1 ชุดข้อมูล ดังรูปที่ 4 (ข้อมูลชุดที่ 1 ราคามันสำปะหลัง) จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ข้อมูลการเรียนรู้ (Training Dataset) และชุดที่ 2 ข้อมูลการทดสอบ (Testing Dataset) (ข้อมูลราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และข้อมูลราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกัน) จากนั้นทำการพยากรณ์แต่ละองค์ประกอบ (IMFs) ด้วยตัวแบบ LSTM โดยกำหนด Epochs= 20, Batch Size =1, Step = 1, Activation = Relu และ Optimizer = Adam (ดังรูปที่ 5) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากันทั้ง 3 ชุด เนื่องจากทดลองใช้กับข้อมูล พบว่า มีค่าความแม่นยำมากที่สุด เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม นำค่าดังกล่าวมา กำหนดตัวแบบและพยากรณ์ล่วงหน้า เมื่อได้ค่าพยากรณ์ทำการแปลงค่ากลับให้มีหน่วยเหมือนกับข้อมูลจริง ผลการพยากรณ์และค่าการตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบแสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าจริงและค่าพยากรณ์ของตัวแบบ ANN ตัวแบบ LSTM และตัวแบบ HybridEMD-LSTM ของข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพีซีไทร์ 3 ชุด

ข้อมูลจริง	ราคามันสำปะหลัง			ข้อมูลจริง	ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์		
	ANN	LSTM	HybridEMD-LSTM		ANN	LSTM	HybridEMD-LSTM
1.94	1.94	1.92	1.94	7.81	8.34	7.79	7.79
1.92	1.83	1.92	1.97	7.46	8.72	7.91	7.69
1.89	1.76	1.94	1.91	7.42	8.75	7.54	7.60
1.73	1.79	1.87	1.81	7.49	9.02	7.50	7.59
1.67	1.74	1.71	1.70	7.72	8.79	7.58	7.65
1.62	1.71	1.65	1.63	7.92	8.91	7.82	7.79
1.64	1.62	1.6	1.62	8.12	8.53	8.03	7.90



ตารางที่ 2 ค่าจริงและค่าพยากรณ์ของตัวแบบ ANN ตัวแบบ LSTM และตัวแบบ HybridEMD-LSTM ของข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพีซีไทร์ 3 ชุด (ต่อ)

ข้อมูลจริง	ราคามันสำปะหลัง			ข้อมูลจริง	ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์		
	ANN	LSTM	HybridEMD-LSTM		ANN	LSTM	HybridEMD-LSTM
1.73	1.74	1.62	1.71	7.49	8.24	8.25	7.90
1.76	1.73	1.71	1.74	7.6	7.94	7.58	7.68
1.74	1.52	1.74	1.73	7.44	7.79	7.69	7.59
1.85	1.68	1.72	1.84	7.68	8.07	7.52	7.57
2.05	1.81	1.83	1.98	7.9	8.20	7.78	7.70
2.03	1.71	2.04	1.99	8.15	8.34	8.01	7.89
2.07	1.65	2.01	2.04	8.15	8.41	8.28	8.05
2.13	1.71	2.06	2.07	8.06	8.39	8.28	8.08
2.08	1.66	2.12	2.07	7.93	8.69	8.18	8.04
1.92	1.59	2.07	2.02	7.69	8.84	8.04	7.98
1.91	1.34	1.9	1.95	8.07	8.91	7.79	7.93
1.97	1.24	1.89	1.93	8.29	8.60	8.19	8.02
2.02	1.24	1.95	1.96	7.72	8.37	8.43	8.08
2.12	1.19	2	2.02	8.23	7.91	7.82	8.04
2.08	1.22	2.11	2.06	8.4	7.72	8.37	8.21
2.19	1.26	2.07	2.1	8.76	7.81	8.56	8.41
2.28	1.34	2.19	2.16	8.97	8.21	8.96	8.62
2.29	1.33	2.29	2.20	8.85	8.31	9.21	8.70



ตารางที่ 2 ค่าจริงและค่าพยากรณ์ของตัวแบบ ANN ตัวแบบ LSTM และตัวแบบ HybridEMD-LSTM ของข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพีซีไร์ 3 ชุด (ต่อ)

ราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ			
ข้อมูลจริง	ANN	LSTM	HybridEMD-LSTM
7,756	7,701.58	7,556.22	7,753.22
8,166	7,706.02	7,802.41	7,926.32
8,655	7,703.92	8,194.02	8,347.37
9,453	7,736.45	8,673.45	8,752.46
9,319	7,721.09	9,484.68	8,930.10
9,052	7,725.20	9,345.95	9,053.33
8,910	7,742.33	9,072.55	9,047.00
9,297	7,740.51	8,928.78	8,973.33
9,419	7,747.43	9,323.28	9,306.37
8,804	7,749.00	9,449.38	8,929.94
8,281	7,747.64	8,822.20	8,640.52
8,408	7,752.49	8,305.56	8,425.55
9,001	7,754.28	8,429.60	8,464.21
9,148	7,755.97	9,020.79	8,684.39
9,312	7,758.69	9,170.39	8,787.12
9,068	7,760.41	9,338.74	8,857.95
8,742	7,762.46	9,088.83	8,716.23
8,474	7,765.05	8,760.15	8,485.86
8,257	7,767.04	8,494.42	8,220.59
7,508	7,769.08	8,282.22	7,941.69
7,442	7,771.27	7,570.11	7,535.46
7,586	7,773.21	7,508.87	7,417.88
7,693	7,775.30	7,642.80	7,471.66
7,788	7,777.41	7,743.07	7,561.04
7,934	7,779.42	7,832.64	7,836.76



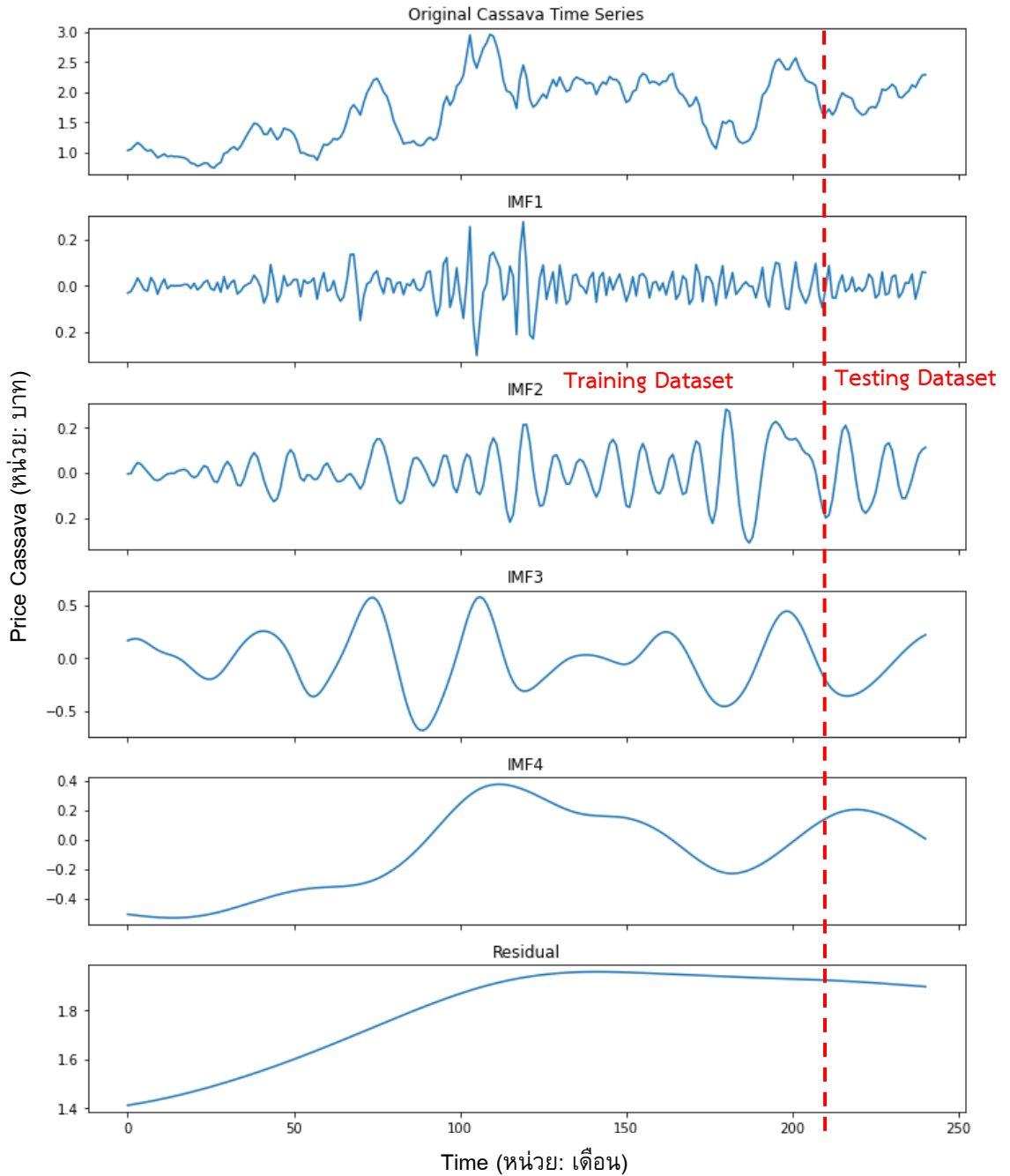
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาราคาฟิวเจอร์ 3 ชุด

ข้อมูล	ตัวแบบ	MAE	RMSE	MAPE
ราคามันสำปะหลัง	ANN	0.3896	0.5161	0.1885
	LSTM	0.0672	0.0868	0.0346
	HybridEMD-LSTM	0.0456	0.0568	0.0227
ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	ANN	0.6796	0.7743	0.0863
	LSTM	0.2172	0.2923	0.0276
	HybridEMD-LSTM	0.1872	0.2146	0.0234
ราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ	ANN	857.9788	1026.5670	0.0961
	LSTM	293.454	364.8786	0.0342
	HybridEMD-LSTM	229.894	298.1984	0.0265

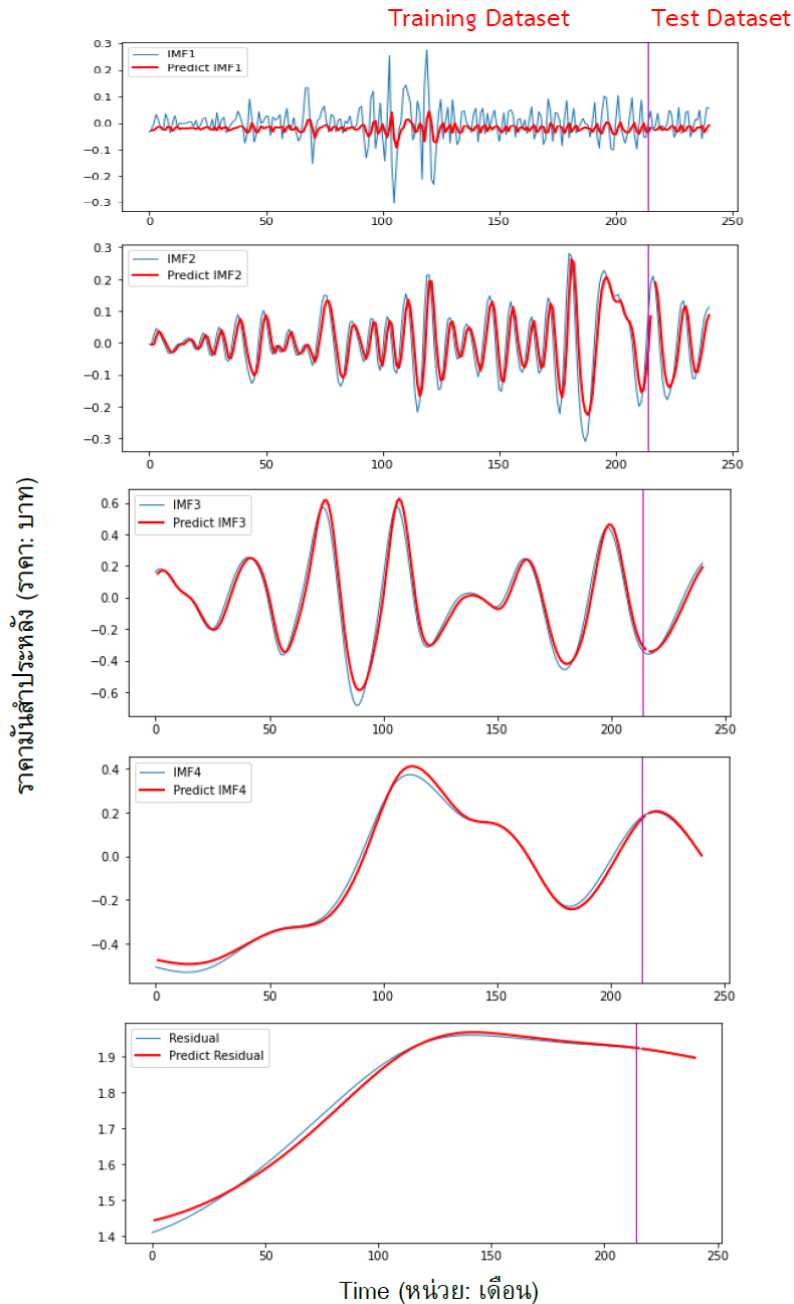
3.3 อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ พบว่า วิธีการพยากรณ์ด้วยตัวแบบผสมระหว่างเทคนิควิธีการแยกองค์ประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition :EMD) กับวิธีการพยากรณ์โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Long Short Term Memory : LSTM) เรียกว่า ตัวแบบ Hybrid EMD-LSTM มีความแม่นยำในการพยากรณ์ราคาฟิวเจอร์ทั้ง 3 ชุด มากกว่าตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network Model : ANN) และตัวแบบ LSTM ในทุกเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพ (ตารางที่ 3) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [14-21, 27] ทั้งนี้เนื่องจากตัวแบบ Hybrid EMD-LSTM ได้ประยุกต์ใช้วิธี EMD ซึ่งเป็นวิธีการแบ่งข้อมูลอนุกรมเวลาออกเป็น ส่วน ๆ เรียกว่า ฟังก์ชันภายใน (Intrinsic Mode Function: IMF) เป็นการลดสัญญาณแกว่งไวของข้อมูล (Fast Oscillation) และนำองค์ประกอบฟังก์ชันภายในไปพยากรณ์ด้วยตัวแบบ LSTM จากนั้นนำค่าการพยากรณ์แต่ละองค์ประกอบมารวมเป็นค่าพยากรณ์ในขั้นตอน

สุดท้าย ทำให้ได้ค่าพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูง ในส่วนของการประยุกต์ใช้งาน พบว่า ตัวแบบ ANN และตัวแบบ LSTM เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นตัวแบบที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าตัวแบบผสม ถ้าผู้ใช้งานต้องการตัวแบบพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูงใช้ได้กับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีความผันผวนสูง แนะนำควรเลือกใช้ตัวแบบ Hybrid EMD-LSTM เพราะจะทำให้ได้ค่าพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูง การวิจัยนี้มุ่งศึกษาและนำเสนอตัวแบบพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาราคาฟิวเจอร์ 3 ชุด ได้แก่ ราคามันสำปะหลัง ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่สำคัญสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำตัวแบบดังกล่าวนี้ ไปใช้สำหรับการทำนายราคาฟิวเจอร์ทั้ง 3 ชนิด จากนั้นนำเสนอสารสนเทศที่ได้นำมากำหนดเป็นแนวทางในการวางแผนหรือกำหนดเป็นกลยุทธ์เชิงนโยบายสำหรับแนะนำเกษตรกรเพื่อผลิตฟิวเจอร์ทั้ง 3 ชนิดนี้ การใช้งานอาจนำตัวแบบผสมที่พัฒนาขึ้นพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันเพื่อให้ง่ายสำหรับการใช้งานต่อไป



รูปที่ 4 องค์ประกอบ (IMFs) ข้อมูลอนุกรมเวลาราคามันสำปะหลัง



รูปที่ 5 ค่าจริงและค่าพยากรณ์แต่ละองค์ประกอบ (IMFs) ข้อมูลอนุกรมเวลาราคามันสำปะหลังด้วยตัวแบบ HybridEMD-LSTM



4. บทสรุป

การศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยนำเสนอวิธีการสร้างและคัดเลือกตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพืชไร่ของประเทศไทย จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ราคามันสำปะหลัง ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และราคาข้าวเปลือกเจ้าหอมมะลิ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2545 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2565 จำนวน 241 ค่า จากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ด้วยตัวแบบ ANN ตัวแบบ LSTM และตัวแบบ HybridEMD-LSTM ผลการวิจัย พบว่า ตัวแบบ HybridEMD-LSTM มีความแม่นยำมากกว่าตัวแบบ ANN และตัวแบบ LSTM ดังนั้นสรุปได้ว่า ตัวแบบผสมที่ทีมผู้วิจัยนำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำไปพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาราคาพืชไร่ทั้ง 3 ชนิด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่อนุเคราะห์สถานที่สำหรับการวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Thongmeethip, Agricultural development in Thailand in terms of community development and quality of life, PSDS Journal of Development Studies, Puey Ungphakorn School of Development Studies, Thammasat University, 2021, 4(1), 132-162. (in Thai)
- [2] <http://www.nso.go.th> (Accessed on 20 March 2022)
- [3] <https://data.worldbank.org> (Accessed on 20 March 2022)
- [4] Office of agricultural economics, Agricultural statistics of Thailand 2020, Office of agricultural economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, 2021.
- [5] <https://www.oae.go.th> (Accessed on 21 March 2022)
- [6] W. Riansut and K. Thongrit, Forecasting the price of field corn in Thailand, RUMTP Research Journal, 2017, 11(1), 1-14. (in Thai)
- [7] S. Deepradit and P. Rukson, The forecasting techniques comparison of field crops in Thailand, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(3), 214 – 231. (in Thai)
- [8] T. Xiong, C. Li, and Y. Bao, Seasonal forecasting of agricultural commodity price using a hybrid STL and ELM method: Evidence from the vegetable market in China, Neurocomputing, 2018, 275, 2831-2844.
- [9] T. Iizumi, Y. Shin, W. Kim, M. Kim and J. Choi, Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble, Climate Services, 2018, 11, 13-23.



- [10] S.Y. Han, T.F.A. Bishop and P. Filippi, Data-driven, early-season forecasts of block sugarcane yield for precision agriculture, *Field Crops Research*, 2022, 276, 108360.
- [11] T. Sujjaviriyasup, Artificial neural network model for forecasting monthly price of maize in Thailand, *Srinakharinwirot Science Journal*, 2018, 34(1), 91-107. (in Thai)
- [12] H. Yin, D. Jin, Y.H. Gu, C.J. Park, S.K. Han and S.J. Yoo, STL-ATTLSTM: Vegetable price forecasting using STL and attention mechanism-based LSTM, *Agriculture*, 2020, 10(12), 612.
- [13] N. Filipović, S. Brdar, G. Mimić, O. Marko and V. Crnojević, Regional soil moisture prediction system based on Long Short-Term Memory network, *Biosystems Engineering*, 2022, 213, 30-38.
- [14] J. Zhang, Y. Meng, J. Wei, J. Chen and J. Qin, A novel hybrid deep learning model for sugar price forecasting based on time series decomposition, *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 6507688.
- [15] L. Yu, S. Liang, R. Chen and K.K. Lai, Predicting monthly biofuel production using a hybrid ensemble forecasting methodology, *International Journal of Forecasting*, 2022, 38(1), 3-20.
- [16] H. Rezaei, H. Faaljou and G. Mansourfar, Stock price prediction using deep learning and frequency decomposition, *Expert Systems with Applications*, 2021, 169, 114332.
- [17] B. Gao, X. Huang, J. Shi, Y. Tai and J. Zhang, Hourly forecasting of solar irradiance based on CEEMDAN and multi-strategy CNN-LSTM neural networks, *Renewable Energy*, 2020, 162, 1665-1683.
- [18] W. Liu, W.D. Liu and J. Gu, Forecasting oil production using ensemble empirical model decomposition based Long Short-Term Memory neural network, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 189, 107013.
- [19] Y.-X. Wu, Q.-B. Wu and J.-Q. Zhu. Improved EEMD-based crude oil price forecasting using LSTM networks, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 516, 114-124.
- [20] X. Yan, Y. Liu, Y. Xu and M. Jia, Multistep forecasting for diurnal wind speed based on hybrid deep learning model with improved singular spectrum decomposition, *Energy Conversion and Management*, 2020, 225, 113456.
- [21] J. Cao, Z. Li and J. Li, Financial time series forecasting model based on CEEMDAN and LSTM, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 519, 127-139.



- [22] Y. Dong, C. Zhang, M. Niu, S. Wang and S. Sun, Air pollution forecasting with multivariate interval decomposition ensemble approach, *Atmospheric Pollution Research*, 2021, 12(12), 101230.
- [23] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung and H.H. Liu, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971), 903–995.
- [24] N. Kulvanich, Improving prediction accuracy of time series data using ARIMA-ANN hybrid model and regression analysis, *Thai Science and Technology Journal*, 2020, 28(12), 2101-2112. (in Thai)
- [25] M. Niu, S. Sun, J. Wu, L. Yu and J. Wang, An innovative integrated model using the singular spectrum analysis and nonlinear multi-layer perceptron network optimized by hybrid intelligent algorithm for short-term load forecasting, *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(5-6), 4079-4093.
- [26] G.P. Zhang, Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model, *Neurocomputing*, 2003, 50, 159-175.
- [27] Y. Lin, Y. Yan, J. Xu, Y. Liao, and F. Ma, Forecasting stock index price using the CEEMDAN-LSTM model, *The North American Journal of Economics and Finance*, 2021, 57, 101421.
- [28] <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/> (Accessed on 18 March 2022)

ผลของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ปลาดุก (*Clarias*) แปรรูป

กานต์พิชชา สุวรรณวัฒนเมธี^{1,2} สุชาติดา คันธารส¹ และ สุรัชชัย ชันแก้ว^{1,2*}

¹ สาขาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ศูนย์นวัตกรรมออกแบบและสื่อคอนเวอร์เจนซ์, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: surachai@rmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 มิถุนายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 19 กันยายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 11 ตุลาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 23 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการบรรจุแบบแอคทีฟที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาดุกและเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาดุกที่บรรจุด้วยรูปแบบและวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน โดยผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาดุกในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ปลาดุกเส้นหวาน (SwC) ปลาดุกเส้นเค็ม (SaC) และปลาดุกแผ่นกรอบ (CrC) ทั้งสามถูกทดสอบคุณภาพและอายุการเก็บรักษาโดยเปลี่ยนแปลงรูปแบบการบรรจุที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การบรรจุด้วยบรรยากาศปกติ, การบรรจุแบบสุญญากาศ (VP) และการบรรจุแบบแทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน (NFP) และบรรจุในถุงบรรจุภัณฑ์ที่มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนในระดับต่ำและใช้วัสดุแอคทีฟชนิดดูดซับแก๊สออกซิเจน (OA) และดูดซับความชื้น (MA) โดยผลด้านคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ทั้งสามพบว่า มีแนวโน้มแสดงถึงการเสื่อมสภาพทั้งในเชิงประสาทสัมผัส เชิงเคมี และสี เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นไปตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ผลที่ดีที่สุดในการวิจัยพบว่าผู้ประเมินยังยอมรับผลิตภัณฑ์ได้เมื่อบรรจุด้วยรูปแบบ NFP/OA สำหรับผลิตภัณฑ์ SwC ที่เวลา 20 สัปดาห์ และรูปแบบ NFP/OA/MA สำหรับผลิตภัณฑ์ SaC และ CrC ที่เวลามากกว่า 24 ($P \leq 0.05$) และเป็นผลให้ต้นทุนการบรรจุภัณฑ์สูงขึ้นอย่างน้อย 1.75 บาท โดยผลการเปลี่ยนแปลงระดับกลิ่นหืนและความแตกต่างสีรวมของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาดุก รวมถึงการใช้ผลของงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ปลาดุกแผ่นกรอบกลุ่มชุมชนลำไทรพัฒนายังได้รายงานไว้ในบทความเรื่องนี้ด้วย

คำสำคัญ: ผลิตภัณฑ์ปลาดุก; บรรจุภัณฑ์; การบรรจุแบบแอคทีฟ

Effect of Active Packaging on the Quality of Processed-Catfish (*Clarias*) Products

Kanpicha Suwannawanamatee^{1, 2}, Suchada Kantaros¹ and Surachai Khankaew^{1, 2*}

1 Program of Digital Printing and Packaging Technology, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

2 Innovation Design and Convergence Media Center, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

* Corresponding author, E-mail: surachai@rmutt.ac.th

Received: 9 June 2022; Revised: 19 September 2022; Accepted: 11 October 2022

Online Published: 23 December 2022

Abstract: The objectives of this research were to study the effects of active packaging on the qualities of processed-catfish products and to study the shelf-life of the products that are packed by the different types of packing and materials. The processed-catfish product in this research was sweet-dried catfish (SwC), salt-dried catfish (SaC), and crisp-fried catfish (CrC). All products were tested on their quality and shelf-life. Three different packing types were atmosphere (air) packaging (control), vacuum packaging (VP), and nitrogen-flushed packaging (NFP) with a low oxygen transmission rate (OTR) in packaging bags and active materials that were an oxygen absorber (OA) and a moisture absorber (MA). Quality and shelf-life results of these three products found that they tended to show continuous deterioration of the sensory, chemical, and color depending on the storage time. The best results in this research revealed SwC was accepted by the evaluators when it was packed with NFP/OA at 20 weeks, while the NFP/OA/MA for the SaC, and CrC at 24 weeks ($P \leq 0.05$). It was affected by the increasing cost of packaging of 1.75 baht. Overall, the increased rancidity level, total color difference of processed-catfish products, and application of the results with CrC product from the 'Lam Srai Pattana' community group were reported.

Keywords: catfish product; packaging; active packaging



1. บทนำ

การบรรจุแบบแอคทีฟ (Active Packaging) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีทางบรรจุภัณฑ์ที่พัฒนามาจากเทคโนโลยีการบรรจุแบบดั้งเดิมหรือที่เรียกว่าการบรรจุแบบพาสซีฟ (Passive Packaging) ซึ่งเป็นกลุ่มย่อยภายใต้การบรรจุแบบสมาร์ท (Smart Packaging) Suppakul [1] กล่าวว่า การบรรจุแบบแอคทีฟเป็นรูปแบบของการบรรจุซึ่งบรรจุภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ และสิ่งแวดล้อมมีปฏิริยาสัมพันธ์กัน เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพิ่มความปลอดภัยหรือเสริมคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ รวมถึงพร้อมกับการรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้วย ตัวอย่างวัสดุการบรรจุแบบแอคทีฟ เช่น วัสดุดูดแก๊สออกซิเจน (Oxygen Absorber) วัสดุดูดซับความชื้น (Moisture Absorber) วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Absorber) วัสดุต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial Film) และวัสดุขัดขวางแก๊สเอทิลีน (Ethylene Inhibitor Film) เป็นต้น [1, 2] จากจุดเด่นของเทคโนโลยีการบรรจุแบบแอคทีฟที่มีความหลากหลายและมีประสิทธิภาพสูง โดยสามารถประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายและครอบคลุมผลิตภัณฑ์ทุกประเภท โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์อาหาร ยา เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

Monção และคณะ [2] รายงานว่า วัสดุแอคทีฟประเภทตัวดูดซับแก๊สออกซิเจนได้รับความนิยมอย่างสูงสำหรับใช้ร่วมกับผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Lipid Oxidation) โดยการกำจัดและลดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์จนเหลือเพียง 0.01% (100 ppm) เท่านั้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและอายุการเก็บรักษานานขึ้น รวมถึงยังมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูง

ในการกำจัดแก๊สออกซิเจน ขณะที่ตัวดูดซับความชื้นที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งหรือกึ่งแห้งเกิดการเสื่อมสภาพช้าลงได้ [1]

ปลาดุกอูย (*Clarias macrocephalus*) ปลาดุกต๋าน (*Clarias batrachus*) และปลาดุกอุยเทศ (*Clarias gariepinus*) เป็นปลาเศรษฐกิจของไทย เนื่องจากมีราคาถูก สามารถเพาะขยายพันธุ์ได้ง่าย และเติบโตได้ดีในแหล่งน้ำจืดทุกภาคของประเทศ [3] จากสถิติปลาน้ำจืดพบว่าปลาดุกเป็นปลาเศรษฐกิจอันดับ 2 รองจากปลานิล และมีผลผลิตเพิ่มขึ้นทุกปี ข้อมูลปี พ.ศ.2563 พบว่ามีผลผลิตรวม 67,257.37 ตัน แต่กลับพบว่าตลาดการบริโภคปลาดุกส่วนใหญ่เป็นตลาดในประเทศ สำหรับตลาดต่างประเทศมีการส่งออกเพียงประมาณ 2.61% เท่านั้น (ข้อมูลปี พ.ศ. 2561 [3]) โดยปัจจัยสำคัญคือ คุณภาพ ต้นทุน มาตรฐานจากผู้ค้า และราคา ที่ผันผวน ทั้งนี้ จากแผนปฏิบัติการพัฒนาปลาดุก ปี พ.ศ. 2563 - 2565 รายงานว่า แนวทางการพัฒนาเชิงปรับตัวที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงปลาดุกคือการวางแผนการผลิตและส่งเสริมให้มีการแปรรูปเพื่อเพิ่มช่องทางการจำหน่ายอย่างบูรณาการ [3] ปัจจุบัน มีการแปรรูปปลาดุกเพื่อการจำหน่ายเชิงพาณิชย์อย่างหลากหลาย อาทิ ปลาดุกตากแห้ง ปลาดุกแดดเดียว ปลาดุกเส้น และการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภค เช่น น้ำพริก และไส้กรอก เป็นต้น [4]

ผลิตภัณฑ์ปลาดุกเส้นหวาน ปลาดุกเส้นเค็ม และปลาดุกแผ่นกรอบ เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ปลาดุกแปรรูปของวิสาหกิจลำไทรพัฒนา ต.ลำไทร อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี ซึ่งมีชื่อเสียงด้านการเพาะเลี้ยงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปลาดุกทั้งในระดับชุมชนและระดับกลุ่มผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) ของ



ประเทศ โดยผลิตภัณฑ์ปลาดุกของกลุ่มมีรสชาติและคุณภาพที่โดดเด่นจนได้รับความนิยม และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มกว่า 3-5 เท่า [5] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปลาดุกเป็นปลาหนังที่มีปริมาณไขมันสูง (กรณีปลาดุกเลี้ยงมีไขมันสูงถึง 4.79 – 17.56 % wt. ขึ้นอยู่กับส่วนเนื้อเยื่อที่พิจารณา) [4, 6] มติชนออนไลน์ [7] รายงานว่าในปลาดุกมีไขมัน 14.70 กรัม เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวถึง 2.40 กรัม หรือ 16.33 % wt. เมื่อนำมาแปรรูปจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาดุกเกิดการเหม็นหืน (Rancid) ด้วยปฏิกิริยาของไขมันกับแก๊สออกซิเจนในอากาศ เมื่อเก็บในเวลานาน และส่งผลต่ออายุการเก็บรักษา (Shelf-life) ตามลำดับ [6] ฉะนั้น รูปแบบการบรรจุที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์ที่มีไขมัน โดยเฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid, USFA) เป็นองค์ประกอบนั้น จึงควรพิจารณาตั้งแต่วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการสกัดกั้นแก๊สออกซิเจนได้เป็นอย่างดี รวมถึงกระบวนการบรรจุและการปิดผนึก และ/หรือ การใช้วัสดุเอกที่พร้อมด้วยจะสามารถส่งเสริมการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม ลดอัตราการเสื่อมสภาพ และยังคงคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น

งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการบรรจุแบบเอกที่พร้อมด้วยวัสดุบรรจุภัณฑ์และรูปแบบการบรรจุที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ปลาดุกแปรรูป โดยพิจารณาผลเชิงคุณภาพและอายุการเก็บรักษาเพื่อการประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์จริงของชุมชน โดยหวังว่าจะมีคุณภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงในอนาคตอย่างต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพและเกิดประสิทธิผลต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ปลาดุกเส้นหวาน (Sweet-dried Catfish, SwC) ปลาดุกเส้นเค็ม (Salted-dried Catfish, SaC) และปลาดุกแผ่นกรอบ (Crispy Chip Catfish, CrC) ในงานวิจัยนี้ได้รับอนุเคราะห์จากวิสาหกิจชุมชนลำไทรพัฒนา ต.ลำไทร อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี ซึ่งผลิตและนำมาศึกษาที่ห้องปฏิบัติการวัสดุทางการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยใช้เวลาเดินทางไม่เกิน 3.0 ชั่วโมง, ซองดูดแก๊สออกซิเจน (Oxygen Absorber, OA, Iron Oxide, Longer Keep™) ขนาด 30 cm² (ซีซี) หรือน้ำหนักรวมบรรจุภัณฑ์ 1.384 ± 0.1043 กรัม, ซองดูดความชื้น (Moisture Absorber, MA, Blue Silica Gel, HI DRI®) ขนาด 1.0 กรัม, ถุงพลาสติกไนลอนลามิเนตร่วมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่เป็นเส้นตรง (Nylon/Linear Low Density Polyethylene, Nylon/LLDPE) ขนาด 12.70 x 17.78 ซม. (5 x 7 นิ้ว) ความหนารวม 75.80 ± 2.39 μm และมีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate, OTR) 56.10 cc.m².day⁻¹ (ASTM D 3985-05) จากบริษัท บางกอก เบสแพคส์ จำกัด, เครื่องบรรจุและปิดผนึกระบบสุญญากาศ (Vacuum Packaging Machine, VM-400, Brother®, China), เครื่องบรรจุและปิดผนึกแบบแทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen Flushing Packaging Machine, NSM, BROTHER™, Thailand), เครื่องปิดผนึกแบบคั้นโยก (Manual Heat Sealing Maching, SAIFPRO 24, China), ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (UF110, Memmert GmbH, ประเทศเยอรมนี)



2.2 การเตรียมผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุก

ปลาตุกเส้นหวานและปลาตุกเส้นเค็ม คัดเลือกโดยกำหนดขนาดความยาวเฉลี่ย 10.0 ± 2.0 ซม. และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.0 ± 0.5 ซม. ส่วนปลาตุกแผ่นกรอบกำหนดขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้างและยาวเฉลี่ย 3.0 ± 0.3 ซม. ดังรูปที่ 1

2.3 การบรรจุผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุก

SwC และ SaC ถูกบรรจุลงในถุงพลาสติก Nylon/LLDPE โดยควบคุมน้ำหนักที่ 50.0 ± 1.0 กรัม ขณะที่ CrC ที่มีความบางและน้ำหนักเบาที่จะบรรจุลงในถุงตัวอย่างละ 35.0 ± 1.0 กรัม ซึ่งใช้วิธีบรรจุที่แตกต่างกัน 3 วิธี ร่วมกับวัตถุแอกทีฟทั้ง 2 ชนิด ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ทั้งนี้ การออกแบบสิ่งทดลองพิจารณาจากปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุกทั้งหมดมีไขมันเป็นองค์ประกอบและสามารถเกิดการเหม็นหืนได้จากปฏิกิริยาของไขมันกับแก๊สออกซิเจนเป็นปัจจัยหลักและความชื้นเป็นปัจจัยรอง การบรรจุที่เหมาะสมจึงต้องอยู่ในสภาวะที่ไร้แก๊สออกซิเจน ขณะที่ SwC เป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังคงมีความชื้นเพื่อให้เนื้อสัมผัสมีความเหนียวนุ่ม การสูญเสียความชื้นจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหนียวและแข็งเกินไป และ SaC เป็นผลิตภัณฑ์ที่ตากจนแห้งและผ่านการทอด สลัดน้ำมัน และอบไล่ความชื้นเพื่อให้แห้งและกรอบ การได้รับความชื้นจะส่งผลให้เกิดความเหนียวและส่งเสริมให้เกิดกลิ่นหืนได้ง่าย ขณะที่ CrC เป็นผลิตภัณฑ์ที่บาง กรอบ และสามารถแตกหักได้โดยง่าย จึงไม่เหมาะสมกับวิธีการบรรจุแบบ VP จากเงื่อนไขของผลิตภัณฑ์ สิ่งทดลองในการวิจัยเป็นไปดังตารางที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุกจากซ้ายปลาตุกเส้นหวาน (SwC), ปลาตุกเส้นเค็ม (SaC และปลาตุกแผ่นกรอบ (CrC)

ตารางที่ 1 สิ่งทดลอง (Experimental Treatments)

Packaging Method/ Active Material	Sample		
	SwC	SaC	CrC
Control (<i>Ambient Air without Active Material</i>)	●	●	●
VP	●	●	-
VP/OA	●	●	-
VP/OA/MA	-	●	-
NFP	●	●	●
NFP/OA	●	●	●
NFP/OA/MA	-	●	●

หมายเหตุ VP คือการบรรจุแบบสุญญากาศ, VP/OA คือการบรรจุแบบสุญญากาศร่วมกับซองดูดแก๊สออกซิเจน, VP/OA/MA คือ การบรรจุแบบสุญญากาศร่วมกับซองดูดแก๊สออกซิเจนและซองดูดความชื้น, NFP คือ การบรรจุแบบแทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน, NFP/OA คือ การบรรจุแบบแทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจนร่วมกับซองดูดแก๊สออกซิเจน, NFP/OA/MA คือ การบรรจุแบบสุญญากาศร่วมกับซองดูดแก๊สออกซิเจนและซองดูดความชื้น และสัญลักษณ์ “●” แสดงถึงการเลือกใช้รูปแบบการบรรจุดังกล่าว



2.4 การเก็บและการชักตัวอย่าง

เพื่อศึกษาผลเชิงคุณภาพต่อระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยดัดแปลงจากวิธีของ รัชนีวรรณ กุลจันทร์ [8] ตัวอย่างทั้งหมดถูกเก็บในสภาวะห้องทดลอง (Control) ที่มีความชื้นไม่เกิน 60% RH และอุณหภูมิ $28 \pm 2.0^\circ\text{C}$ โดยทำการดึงตัวอย่างออกมาประเมินคุณภาพด้านต่าง ๆ ทุก 2 สัปดาห์รวมตลอด 24 สัปดาห์ (6 เดือน)

2.5 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ดำเนินการตามวิธี รัชนีวรรณ กุลจันทร์ [8] ซึ่งสามารถอธิบายโดยสรุปได้ดังนี้

2.5.1 การคัดเลือกผู้ทดสอบ โดยใช้ผู้ทดสอบด้วยวิธีสมัครใจเพื่อฝึกเป็นผู้เชี่ยวชาญ (Trained Panelist) ในด้านกลิ่นหืนของผลิตภัณฑ์ปลาตากแปรรูปทั้ง 3 ชนิด โดยให้ความรู้และฝึกฝนผู้ทดสอบให้คุ้นชินที่แท้จริงก่อนจะให้ทดสอบกับผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นแตกต่างกันจากน้อยถึงมากที่สุดที่สุกแล้วด้วยวิธีการนำเสนอแบบสุ่ม (Random) และให้ผู้ทดสอบทำการทดสอบและเรียงลำดับตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของกลิ่นหืนต่างกันทดสอบโดยเว้นช่วงเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง วัตถุประสงค์และให้คะแนนผู้ทดสอบด้วยวิธีสังเกต โดยผู้ที่ทำได้ถูกต้องจะถูกคัดเลือกเป็นอาสาสมัครต่อไป [9]

2.5.2 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยด้านกลิ่นหืนและความพึงพอใจในรสสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบรวม 10 คน แบ่งเป็นเพศชาย 5 คน และหญิง 5 คน ซึ่งมีอายุระหว่าง 20 – 25 ปี ทำการดมกลิ่นและชิมตัวอย่างผลิตภัณฑ์ปลาตากแปรรูปที่ชักออกตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่กำหนด จากนั้นประเมินด้วยแบบประเมิน (Rating Test) [9]

2.5.3 การทดสอบความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์ทำการประเมินผลิตภัณฑ์ภายหลังจากที่ผู้ทดสอบได้ทดสอบทางประสาทสัมผัสตามข้อที่ 2.5.1-2.5.2 เรียบร้อยแล้ว ด้วยแบบประเมินแบบ 9 Point Hedonic Scaling Test ซึ่งประยุกต์ตามวิธีของ ปิยนุสรณ์ น้อยดั่ง และคณะ [10] โดยกำหนดให้ระดับ 1 คือ ไม่มีกลิ่นหืน/ชอบมากที่สุดและระดับ 9 คือ มีกลิ่นหืนรุนแรง/ไม่ชอบมากที่สุด วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นของข้อมูล 95%

2.6 การประเมินคุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ

2.6.1 การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value, PV) ดำเนินการตามวิธีการมาตรฐาน AOCS Cd 8-53 (The American Oil Chemists' Society [AOCS], 1998a) [11] เมื่อได้ไขมันจากตัวอย่างแล้ววิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างไขมัน 5.0 ± 0.05 กรัม ละลายในสารละลายคลอโรฟอร์มและกรดอะซิติกอัตราส่วน 2:3 ส่วน ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลายอิมัลชันโพแทสเซียมไอโอไดด์ 0.5 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 1.0 นาที จากนั้นเติมด้วยน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร และน้ำแบ่งความเข้มข้น 1.0 %wt. ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร จะได้สายละลายสีม่วงเข้ม จากนั้นนำไปไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนกระทั่งตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสารละลายใส บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ [8] เพื่อนำมาคำนวณหาค่าเปอร์ออกไซด์ดังสมการที่ (1) ต่อไปนี้

$$PV = \frac{(M \times A)}{m} \times 1000 \quad (1)$$

โดยที่

PV คือ มิลลิอิกวิวาเลนท์ออกซิเจนต่อกิโลกรัม
น้ำมัน (mEq.kg⁻¹)

M คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไทโอซัลเฟต
(โมลาร์)

A คือ ปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้
(มิลลิลิตร)

m คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)

2.6.2 การประเมินค่าสีของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลา
ดุก โดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Spectrophotometer,
SpectroDens, Techkon®, Königstein, Germany)
วัดในโหมดสี L*, a* และ b* โดยที่ ค่า L* หมายถึง
ความสว่าง a* หมายถึง ความเป็นสีแดงและสีเขียว
และ b* หมายถึง ความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน
ประเมินอย่างน้อย 3 ซ้ำตัวอย่างและตัวอย่างละ 3
ตำแหน่ง ก่อนจะบันทึกค่าเฉลี่ย จากนั้นนำมาศึกษา
ความแตกต่างของสีด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับ
ผลิตภัณฑ์สดใหม่ ด้วยสมการค่าความแตกต่างสีรวม
(Total Color Difference, TCD) ดังสมการที่ (2)
ต่อไปนี้ [12]

$$TCD = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (2)$$

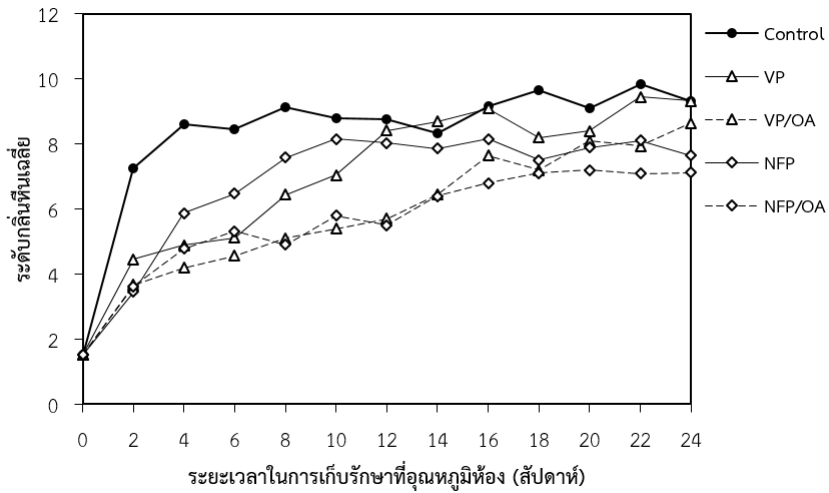
2.7 การนำไปใช้ประโยชน์กับผลิตภัณฑ์ชุมชน

ใช้ผลการศึกษาร่วมถ่ายทอดให้กับกลุ่มเป้าหมาย
พร้อมทั้งนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ปลา
ดุกแปรรูปของกลุ่มวิสาหกิจลำไทรพัฒนา ต.ลำไทร
อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี

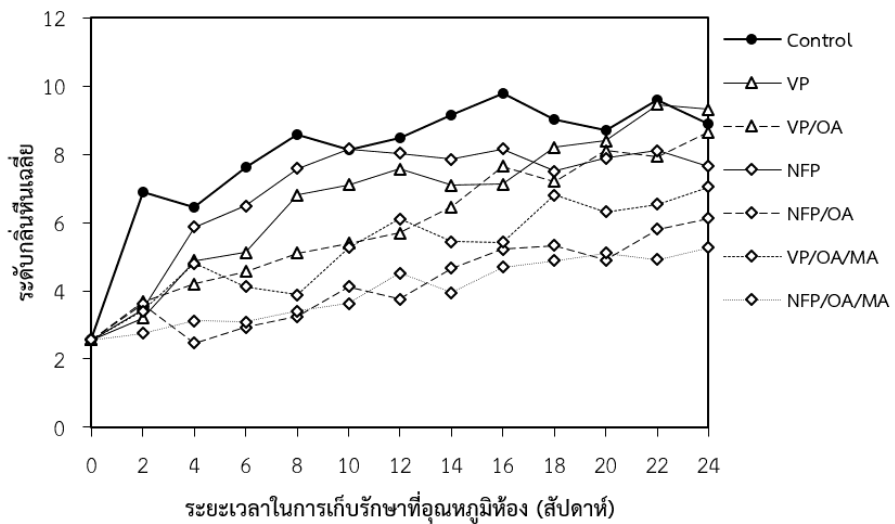
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการทดสอบกลิ่นหืนในผลิตภัณฑ์แปรรูป จากปลาสด

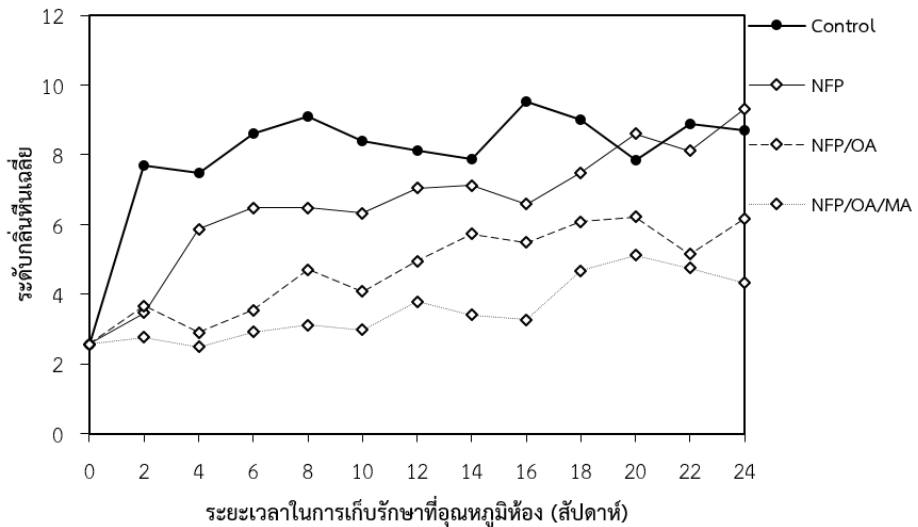
ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาสดทั้งสามชนิด มีผล
เฉลี่ยระดับกลิ่นหืนที่สามารถสัมผัสได้อย่างชัดเจน
(มากกว่าระดับ 6.0) ตั้งแต่สัปดาห์ที่สองของการเก็บ
รักษา โดยเฉพาะเมื่อบรรจุด้วยสภาพบรรยากาศปกติ
(Control) ที่ประกอบด้วยแก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้น (ประมาณ
20.9%, 78.0%, 0.03% และ 60%RH, ตามลำดับ) ทั้งนี้
ยังพบว่าตัวอย่าง SaC ทั้งหมดมีแนวโน้มของระดับ
กลิ่นหืนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และผลที่ดีที่สุดในการ
ทดลองคือตัวอย่างที่บรรจุด้วย NFP/OA รองลงมาคือ
VP/OA และ NFP ตามลำดับ (ดังรูปที่ 2) ซึ่งเป็นไปได้
ชัดว่าการใช้ซองดูดแก๊สออกซิเจนช่วยส่งเสริมการ
จัดการกับแก๊สออกซิเจนที่แพร่ผ่าน และ/หรือ ตกค้าง
ภายในผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการไม่ใช้ซองดูดแก๊ส
ออกซิเจน รวมถึงปริมาณแก๊สที่ตกค้างหรือแพร่ผ่านเข้า
มาภายในนั้นมีส่วนในการส่งเสริมผลด้านต่าง ๆ ด้วย
[2] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า
ตัวอย่างที่บรรจุด้วย NFP/OA แสดงระดับกลิ่นหืนสูงกว่า
5.0 จากส่วนเต็ม 10 คะแนน ที่ประมาณ 12 สัปดาห์
ขณะที่ตัวอย่างปลาสดเส้นเค็ม (SaC) ที่บรรจุในทุก
รูปแบบพบว่า รูปแบบการบรรจุที่ไม่แสดงอาการกลิ่นหืน
ได้ยาวนานที่สุดคือตัวอย่างที่บรรจุแบบแทนที่ด้วยแก๊ส
ไนโตรเจนพร้อมด้วยซองดูดซับแก๊สออกซิเจนและซอง
ดูดซับความชื้น หรือ NFP/OA/MA ตามด้วย NFP/OA ที่
ถึงแม้จะเก็บตัวอย่างนานถึง 24 สัปดาห์ ผู้ประเมินยัง
สามารถสัมผัสกลิ่นหืนระดับ 4 – 6 เท่านั้น (รูปที่ 3) ซึ่ง
สอดคล้องกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ CrC ดังรูปที่ 4



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงกลืนหีนของปลาดุกเส้นหวาน (SwC)



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงกลืนหีนของปลาดุกเส้นเค็ม (SaC)



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงกลืนน้ำของพลาสติกแผ่นกรอบ (CrC)

นอกจากนั้น หากพิจารณาถึงช่องดูดความชื้น (MA) ที่ใช้ร่วมในตัวอย่าง SaC และ CrC จะพบว่า ผู้ประเมินยังยอมรับได้ในคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากกลิ่นและรสที่ขึ้นเร็วกว่าความเหนียวที่เพิ่มขึ้นของ SaC หรือความกรอบที่ลดลงของ CrC ซึ่งอาจเป็นผลจากการใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ชนิด Nylon/LLDPE ซึ่งมักมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Transmittance Rate, WVTR) ค่อนข้างต่ำ รวมทั้งในกระบวนการบรรจุมีการกำจัดอากาศและความชื้นในบรรจุภัณฑ์ เป็นผลให้ภายในบรรจุภัณฑ์มีความชื้นต่ำผลของการใช้ MA จึงแสดงให้เห็นชัดเจนในช่วงระยะเวลาดังกล่าว (6 เดือน)

นอกจากนั้น จากผลยังสามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่า หากบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Lipid Oxidation) ได้ง่ายและเป็นปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (Auto-oxidation) และต่อเนื่อกนั้น [6, 8, 13] การกำจัด

แก๊สออกซิเจนจึงมีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาอย่างยิ่ง และถึงแม้จะบรรจุผลิตภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมก็ตาม การเพิ่มขึ้นของแก๊สออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์จึงเกิดอย่างช้า ๆ เป็นผลมาจากอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของวัสดุบรรจุภัณฑ์ (OTR) ที่เป็นฟังก์ชันโดยตรงต่อปัจจัยทางกายภาพต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน พื้นที่ผิวบรรจุภัณฑ์ และความหนาของบรรจุภัณฑ์ [14] นั้น และส่งผลให้ระดับกลืนน้ำของผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน

3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลา

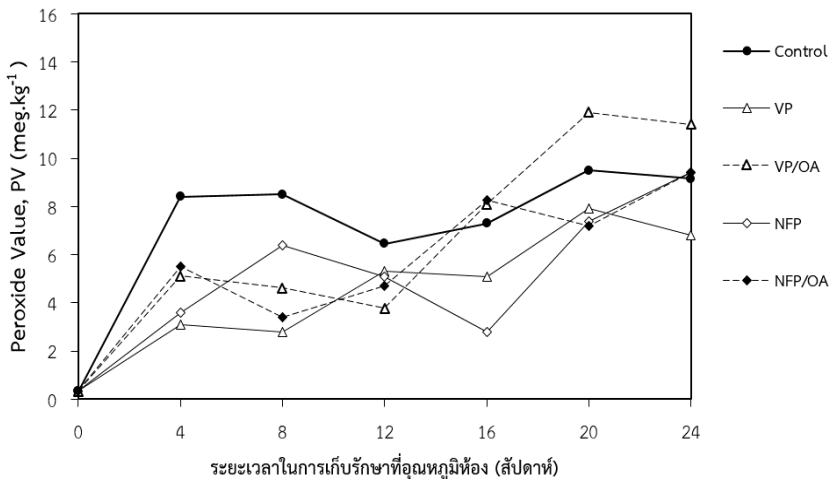
3.2.1 ปริมาณค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) ที่เปลี่ยนแปลงแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไขมันกับแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้น [6, 11, 14] ซึ่งสอดคล้องกับระดับของกลิ่นและรสที่ปรากฏในผลิตภัณฑ์ [7]



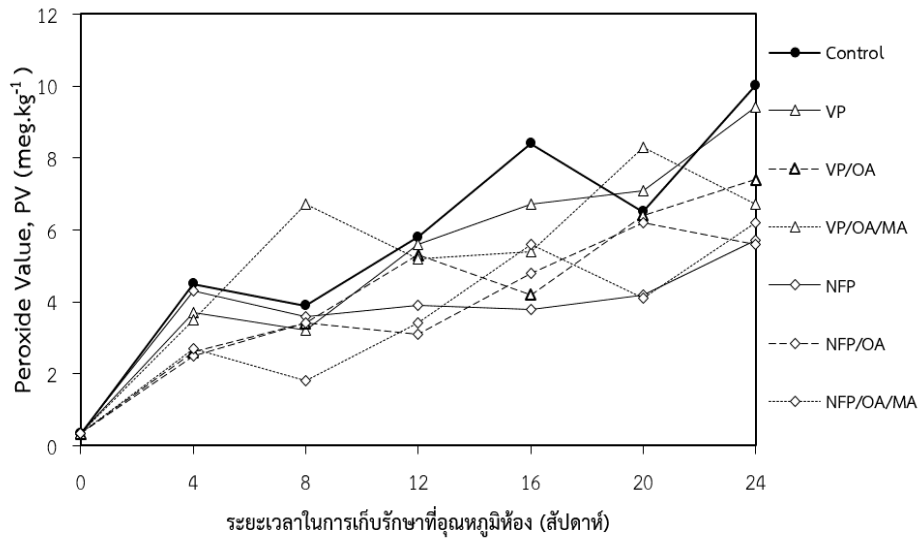
ในกรณีของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุ๋ก พบว่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงแรกของการเก็บรักษา (0-4 สัปดาห์แรก) ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุ๋กชนิด SwC และ CrC ที่บรรจุด้วยบรรยากาศปกติ (Control) มีค่าสูงถึง 8.40 mEq.kg⁻¹ ขณะที่ SaC มีค่าเป็น 4.50 mEq.kg⁻¹ และเมื่อครบระยะเวลาการเก็บรักษา (24 สัปดาห์) พบว่าตัวอย่างข้างต้นมีค่า PV สูงถึง 9.40, 10.02 และ 18.30 mEq.kg⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งนับว่าสูงมาก หากพิจารณาตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 56 (พ.ศ.2524) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 10 mEq.kg⁻¹ [15] จะพบว่า ตัวอย่างที่บรรจุด้วยบรรยากาศปกติชนิด SaC และ CrC มีผลเกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งแสดงถึงกลิ่นหืนมาก สอดคล้องกับผลทางประสาทสัมผัสที่พบกลิ่นหืนและการไม่ยอมรับในผลิตภัณฑ์ของผู้ประเมินตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 เท่านั้น ผลแสดงดังตารางที่ 2

อย่างไรก็ตาม ผลพบว่าทุกตัวอย่างมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า PV อย่างต่อเนื่อง และผลยังเป็นไปตาม

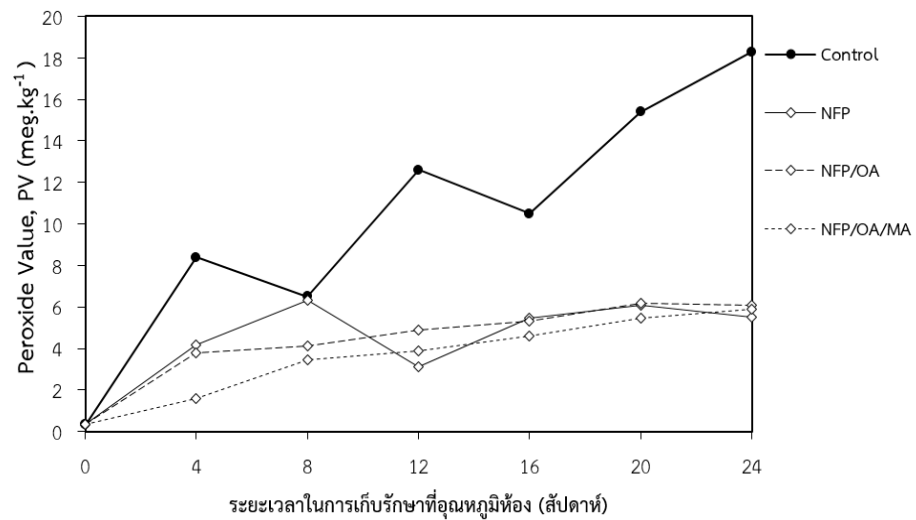
หลักทฤษฎี กล่าวคือ เมื่อตัวอย่างได้รับการบรรจุที่ปลอดแก๊สออกซิเจน (VP และ NFP) การเพิ่มขึ้นของค่า PV มีแนวโน้มต่ำกว่า Control และเมื่อใช้วัสดุแอกทีฟที่มีผลต่อการกำจัดแก๊สออกซิเจนร่วมในบรรจุภัณฑ์ (OA) จะยิ่งส่งเสริมประสิทธิภาพของการบรรจุนั้นได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ จากผลการวิจัยยังพบว่า ตัวอย่างที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า PV ต่ำที่สุดของตัวอย่างผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุ๋กชนิด SwC, SaC และ CrC ได้แก่ NFP/OA, NFP/OA/MA, และ NFP/OA/MA ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น 0.9818, 0.5754, และ 0.6625 mEq.kg⁻¹.week ตามลำดับ นอกจากนี้ จากผลยังสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการบรรจุแบบ NFP ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สออกซิเจนเริ่มต้นได้ดีกว่าวิธีการบรรจุแบบ VP ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับเวลาในการเติมแก๊สไนโตรเจนของ NFP ก่อนการบรรจุ และความดันและเวลาในการตั้งอากาศออกจากบรรจุภัณฑ์แบบ VP ด้วย ผลแสดงดังรูปที่ 5-7



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าเปอร์ออกไซด์(PV) ของปลาตุ๋กเส้นหวาน (SwC)



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าเปอร์ออกไซด์(PV) ของปลาดุกเส้นเค็ม (SaC)



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณค่าเปอร์ออกไซด์(PV) ของปลาดุกแผ่นกรอบ (CrC)



3.2.2 ความแตกต่างรวมของสีผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุ๋นได้รับการประเมินและบันทึกผลด้วยค่า TCD ซึ่งแสดงถึงความต่างสีทั้งในมิติของความเป็นสีเขียว-แดง สีเหลือง-น้ำเงิน และความสว่างสี [12] ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สีของวัตถุจะแสดงความแตกต่างจนสามารถแยกแยะได้ด้วยตาเปล่าเมื่อมีค่าสูงกว่า 2.0 [16] ผลเป็นที่ประจักษ์ชัดว่า หากบรรจุผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุ๋นด้วยบรรยากาศปกติ (Control) ซึ่งมีปริมาณแก๊สออกซิเจนสูงกว่านั้น จะส่งผลให้เปิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว โดยผลิตภัณฑ์ SwC วงไวต่อการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุด (ตารางที่ 2) และเมื่อบรรจุด้วยระบบการบรรจุที่ปลอดภัย แก๊สออกซิเจนสามารถลดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุ๋นทั้งสามชนิดได้

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการเก็บรักษาชิ้นเนื้อสเต็ก (Steak) ที่บรรจุด้วยระบบปรับสภาพบรรยากาศ (Modified Atmosphere Packaging, MAP) แตกต่างกันและเก็บรักษาในอุณหภูมิเย็น (4 °C) และเย็นจัด (-1.5 °C) ซึ่งพบว่าค่าสี L*, a* และ b* ระหว่างสองอุณหภูมิและที่เก็บในอุณหภูมิเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเก็บในสภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนต่างกัน ($P \leq 0.05$) [13]

โดยผลิตภัณฑ์ SwC และ SaC ยังแสดงให้เห็นชัดว่าการบรรจุแบบ VP มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสีสูงกว่า NFP รวมถึงเมื่อใช้วัตถุแอกทีฟร่วมยังมีส่วนลดอัตราการเปลี่ยนแปลงสีได้เพิ่มขึ้นอีกด้วย [13] ผลแสดงดังตารางที่ 2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2 อัตราการเปลี่ยนแปลงสีรวมเริ่มต้นต่อเวลา (K_{in}) ของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุ๋นที่บรรจุด้วยวิธีการและวัตถุแอกทีฟแตกต่างกัน

Packaging Method/ Active Material	Initial Rate Reaction of TCD (K_{in}) / R ²		
	SwC	SaC	CrC
Control	2.8466 / 0.94	1.7610 / 0.95	1.0853 / 0.93
VP	1.9087 / 0.94	1.5648 / 0.82	n/a
VP/OA	1.2258 / 0.83	1.2258 / 0.83	n/a
VP/OA/MA	n/a	1.1685 / 0.89	n/a
NFP	1.5568 / 0.89	0.9652 / 0.92	0.8644 / 0.93
NFP/OA	1.2622 / 0.99	0.8519 / 0.83	0.8611 / 0.96
NFP/OA/MA	n/a	0.7788 / 0.91	0.8427 / 0.97

หมายเหตุ: n/a (Not Applicable) หมายถึง ไม่มีข้อมูล

K_{in} หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงสีรวมเริ่มต้นต่อเวลา (สปีดาร์)



3.3 อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุก

จากผลการประเมินความพึงพอใจโดยสรุปการยอมรับได้ในระดับกลิ่นหืนที่สัมผัสจากตัวอย่างผลิตภัณฑ์พบว่า ผู้ประเมินยอมรับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลาตุกชนิด SwC, SaC และ CrC ที่บรรจุด้วยบรรยากาศปกติ (Control) ที่ระยะเวลาเพียง 2, 1 และ 1 สัปดาห์ ตามลำดับ (ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ชนิด Control ได้ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาก่อนการทดลองโดยซักตัวอย่างทุกสัปดาห์) ในขณะที่ในการศึกษานี้พบว่ารูปแบบการบรรจุและวัตถุดิบที่ใช้มีผลอย่างยิ่งต่อคุณภาพและการยอมรับได้ในกลิ่นหืนที่ผู้ประเมินสัมผัสเช่นเดียวกับในงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้วัตถุดิบที่ฟักกับผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของไขมันชนิดอื่น ๆ เช่น เนื้อวัว ไข่ และผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่น ๆ [13, 17, 18] โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ SwC, SaC และ CrC มีระยะเวลาการเก็บรักษาที่แสดงระดับกลิ่นหืนที่ยอมรับได้สูงสุดถึง 20, 24 และ 24 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการบรรจุร่วมกับวัตถุดิบที่ฟักชนิด NFP/OA สำหรับผลิตภัณฑ์ SwC และชนิด NFP/OA/MA สำหรับผลิตภัณฑ์ SaC และ CrC ผลดังตารางที่ 3

อย่างไรก็ตาม ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ SaC ยังแสดงระดับการยอมรับได้ที่ระยะเวลา 24 สัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อบรรจุด้วย VP/OA/MA ซึ่งนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ผลิตที่ต้องการบรรจุด้วยเทคนิคที่ลดพื้นที่การจัดเก็บได้ จากผลยังแสดงให้เห็นชัดว่าวิธีการบรรจุแบบปลอดแก๊สออกซิเจนพร้อมวัตถุดิบที่ฟักนั้นสามารถช่วยลดอัตราการเกิดกลิ่นหืนและเป็นผลต่อการยอมรับได้อย่างชัดเจน [13, 17]

ตารางที่ 3 ผลระยะเวลาที่เก็บสูงสุดของผู้ประเมินที่ยอมรับได้ในผลิตภัณฑ์

Packaging Method/ Active Material	Maximum Shelf-life (Week)		
	SwC	SaC	CrC
Control	2 ^a	1 ^a	1 ^a
VP	10 ^b	8 ^b	n/a
VP/OA	16 ^c	16 ^c	n/a
VP/OA/MA	n/a	24 ^d	n/a
NFP	10 ^b	6 ^e	8 ^b
NFP/OA	20 ^d	16 ^c	20 ^c
NFP/OA/MA	n/a	6.0 ^d	6.0 ^d

หมายเหตุ: กลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่บรรจุแบบปกติ (Control) ได้ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาก่อนการทดลองโดยซักตัวอย่างทุกสัปดาห์, a, b ที่กำกับตัวเลขในแนวดังเดียวกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, n/a (Not Applicable) หมายถึง ไม่มีข้อมูล

3.4 การนำไปใช้ประโยชน์และถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ชุมชน

ผลของงานวิจัยนี้ได้ถูกถ่ายทอดผ่านผู้นำและสมาชิกของกลุ่มชุมชนวิสาหกิจลำไทรพัฒนา ต.ลำไทร อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี รวมถึงนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ปลาตุกแผ่นกรอบของกลุ่มฯ โดยบูรณาการร่วมกับโครงการวิจัยด้านการออกแบบอัตลักษณ์ชุมชนและการออกแบบบรรจุภัณฑ์ เป็นผลให้ชุมชนได้รับต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่มีการใช้ร่วมกับวัตถุดิบที่ฟักสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้มากกว่าเดิมอย่างน้อย 3 เท่า นอกจากนั้น ชุมชนยังสามารถใช้เป็นแนวทางการวางแผนการผลิตเพื่อควบคุมสินค้าคงคลังในภาวะที่ตลาดผลิตภัณฑ์ขาดแคลน อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยน



รูปที่ 9 ตัวอย่างต้นแบบบรรจุภัณฑ์ที่ประยุกต์ใช้ผล
ของงานวิจัยร่วมกับงานวิจัยด้านการออกแบบ

รูปแบบการบรรจุและวัสดุบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวเป็นผลให้
ต้นทุนด้านการบรรจุต่อหน่วยสูงขึ้นประมาณ 1.75 บาท
จากเดิม 0.90 บาท ซึ่งอาจต้องปรับปริมาณการบรรจุ
ร่วมกับแผนการตลาดให้เหมาะสมกับต้นทุนดังกล่าว
เพื่อให้เกิดความยั่งยืนของการใช้ประโยชน์ต่อไป

4. บทสรุป

รูปแบบการบรรจุแบบ VP และ NFP ที่ใช้ร่วมกับถุง
บรรจุภัณฑ์ LLDPE/Nylon ที่มีอัตราการซึมผ่านของ
แก๊สออกซิเจนต่ำและวัสดุเอกที่ฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้
สามารถลดอัตราการเกิดกลิ่นหืน ลดอัตราการเพิ่มขึ้น
ของค่า PV และอัตราการเปลี่ยนแปลงสีรวมของ
ผลิตภัณฑ์ปลาตากแปรรูป ชนิด SwC, SaC, และ CrC
ได้ โดยเฉพาะ OA ขณะที่ MA อาจแสดงผลไม่ชัดเจน
ซึ่งเกิดจากวัสดุและกระบวนการที่มีส่วนในการป้องกัน
ความชื้น นอกจากนี้ วัสดุเอกที่ฟที่ใช้ยังส่งผลต่อการ
ยอมรับได้ของผู้บริโภคและอายุการเก็บรักษาของ
ผลิตภัณฑ์และเป็นผลให้สามารถคงคุณภาพดังกล่าวได้
นานยิ่งขึ้น

ผลของงานวิจัยนี้ จึงสามารถนำไปใช้เพื่อรักษา
คุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แปรรูปจาก
ปลาดุกรวมถึงผลิตภัณฑ์อื่นที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ
ได้ อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยนรูปแบบการบรรจุและ
วัสดุเอกที่ฟที่ใช้ส่งผลต่อต้นทุนทางการบรรจุและวัสดุ
บรรจุภัณฑ์ในการประยุกต์ใช้ควรพิจารณาถึงต้นทุนการ
บรรจุภัณฑ์ที่สูงขึ้นด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก
โครงการ Pre-Talent Mobility ประจำปี 2563 สัญญา
เลขที่ PT603702 และโครงการหน่วยบริหารและ
จัดการทุนด้านการพัฒนาพื้นที่ (บพท.) ประจำปี
2564 สัญญา เลขที่ CBL-RMUTT64A03 รวมทั้ง
ขอขอบคุณ.ส.วนิดา อาตตะแทน และน.ส.พิชยา
พรหมเวียง นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัล
และบรรจุภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ พร้อมด้วยวิชาวทกิจชุมชนลำไทรพัฒนาที่
ช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดการดำเนินโครงการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Suppakul, Active and intelligent packaging: release and diagnostic, Darnsutha Press Co., Ltd., Bangkok., Thailand, 2018. (in Thai)
- [2] É. da Costa Monção, C.V.B. Grisi, J.M. Fernandes, P.S. Souza and A.L. de Souza, Active packaging for lipid foods and development challenges for marketing, Food Bioscience, 2022, 45, 101370.



- [3] <http://www.inlandfisheries.go.th/images/pdf/p64D.pdf> (Accessed on 12 March 2022) (in Thai)
- [4] A. Thanonkaew, T. Juntachote and S. Pecharat, Effect of fermentation and drying on changes of lipid and protein in dry fermented catfish (Pla-duk-ra) produced from farmed catfish and wild catfish, *Thaksin University Journal*, 2010, 12(3), 214-224. (in Thai)
- [5] W. Puntongsuk and N. Somprasong, The development of processed-catfish products of the 'Lum Sai Pattana', interview report, Research Report, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2021. (in Thai)
- [6] E.N. Frankel, Lipid oxidation, *Progress in Lipid Research*, 1980, 19(1-2), 1-22.
- [7] https://www.matichon.co.th/local/news_194521 (Accessed on 9 September 2022) (in Thai)
- [8] R. Kulchan, Development of rancidity indicator label of infant milk powder, Thesis, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2015. (in Thai)
- [9] <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/handle/123456789/2302> (Accessed on 18 November 2021) (in Thai)
- [10] P. Noiduang, N. Tapaonthong, K. Masileerungsri, Use of dried aril of gac fruit powder as an antioxidant in mayonnaise product, *Journal of Food Technology*, Siam University, 2015, 10(1), 9-18. (in Thai)
- [11] The Association of Official Analytical Chemists, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 17th Ed., MD, USA, 2000.
- [12] F.J. Francis, *Colorimetry of food*, In: M. Peleg, and E.B. Bagly, *Physical properties of food*, The AVI Publishing Company Inc., CT, USA, 1983.
- [13] X. Yang, Y. Zhang, X. Luo, Y. Zhang, L. Zhu, B. Xu, D.L. Hopkins and R. Liang, Influence of oxygen concentration on the fresh and internal cooked color of modified atmosphere packaged dark-cutting beef stored under chilled and superchilled conditions, *Meat Science*, 2022, 188, 108773.
- [14] W. Soroka, *Fundamentals of Packaging Technology*, 3rd Ed., Institute of Packaging Professionals, DC, USA, 2002.
- [15] http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P421.pdf (Accessed on 9 September 2022) (in Thai)



- [16] https://www.viewsonic.com/uk/products/lcd/pdf/ti_delta_E.pdf (Accessed on 12 March 2022)
- [17] S.R. Kanatt, Development of active/intelligent food packaging film containing *Amaranthus* leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage, *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 24, 100506.
- [18] P. Umaraw, P.E.S. Munekata, A.K. Verma, F.J. Barba, V.P. Singh, P. Kumar and J.M. Lorenzo, Edible films/coating with tailored properties for active packaging of meat, fish and derived products, *Trends in Food Science and Technology*, 2020, 98, 10-24.

การสำรวจมาตรฐานความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ: กรณีศึกษา จุดตัดทางรถไฟในจังหวัดฉะเชิงเทรา

จตุพล พิสิษฐศักดิ์* เมธี พรมตिला ธนรัช มั่นมงคล และ กิ่งกาญจน์ กิตติสุนทรโรภาค

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: c90_tor@hotmail.com

วันที่รับบทความ: 9 มิถุนายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 24 สิงหาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 29 กันยายน 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพบริเวณจุดตัดทางรถไฟกับถนน โดยสาเหตุหลักของการเกิดอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟ คือ การไม่ปฏิบัติตามกฎจราจรและการมีอุปกรณ์ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสม ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและตรวจสอบมาตรฐานความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟในจังหวัดฉะเชิงเทรา จำนวน 10 จุด โดยใช้ค่าคุณควบจราจรและการสำรวจอุปกรณ์ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟมาทำการวิเคราะห์ข้อมูล จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์ และจุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว มีค่าคุณควบจราจรมากกว่า 100,000 โดยให้พิจารณาสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบต่างระดับและจากการสำรวจอุปกรณ์ความปลอดภัย พบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ความปลอดภัยได้แก่ ป้ายสัญญาณจราจร สัญญาณบนพื้นทางและระบบไฟฟ้าส่องสว่าง ไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานอุปกรณ์อำนวยความสะดวกของกรมทางหลวงและการรถไฟแห่งประเทศไทย ในบันทึกข้อตกลงระหว่างกรมทางหลวงกับการรถไฟแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2535 ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการด้านความปลอดภัยโดยการเสนอแนวทางในการจัดหาอุปกรณ์มาตรฐานความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ เพื่อเป็นการป้องกันและลดอุบัติเหตุที่ทำให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินต่อไป

คำสำคัญ: รถไฟ; จุดตัดทางรถไฟ; ลักษณะทางกายภาพ; ค่าคุณควบจราจร

Survey of Safety Standards at Railway Intersections: A Case Study of Railway Intersections in Chachoengsao Province

Jatuphon Pisitsak^{*}, Methee Promsila, Tanatat Monmongkol and Kingkarn Kittisuntaropas

Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

^{*} Corresponding author, E-mail: c90_tor@hotmail.com

Received: 9 June 2022; Revised: 24 August 2022; Accepted: 29 September 2022

Online Published: 24 December 2022

Abstract: The objective of this research was to study the physical characteristics of railway and road intersections. The main cause of accidents at railway intersections is non-compliance with traffic rules and improper use of safety equipment at railway intersections. The researcher studied and examined safety standards at 10 railway intersections in Chachoengsao Province. The traffic movement and the survey of safety equipment at railway intersections were used to analyze the data. From the analysis of the data, it was found that Point 9 Phanthong-Ban Pho Road and Point 2 Chachoengsao-Bang Nam-Priao Road There is a traffic movement of more than 100,000, considering the construction of a different level railway crossing and from the survey of safety equipment, it was found that the installation of safety equipment such as traffic signs Road markings and lighting systems. Not in accordance with the standards for safety equipment of the Department of Highways and the State Railway of Thailand In the memorandum of agreement between the Department of Highways and the State Railway of Thailand, B.E. 2535. The results obtained from this research can be applied to safety management by proposing guidelines for procuring standard safety equipment at railway intersections In order to prevent and reduce accidents that cause the loss of life and property in the future.

Keywords: Train; Railway Intersection; Physical Appearance; Traffic Movement



1. บทนำ

แผนยุทธศาสตร์โครงการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก กำหนดให้จังหวัดฉะเชิงเทรา มีทิศทางการพัฒนาเป็นเมืองใหม่ในรูปแบบเมืองพักอาศัย เพื่อรองรับการขยายตัวของจังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยการเปิดพื้นที่ใหม่รอบสถานีรถไฟความเร็วสูงและรถไฟรางคู่ [1] ส่งผลให้มีจำนวนเส้นทางรถไฟเพิ่มมากขึ้น และจากยุทธศาสตร์ของประเทศไทยในการวางแผนพัฒนาเศรษฐกิจในระยะยาวให้ความสำคัญในการสร้างภูมิคุ้มกันแก่ระบบเศรษฐกิจให้สามารถปรับตัวรองรับการเปลี่ยนแปลงได้อย่างเหมาะสม โดยหนึ่งในประเด็นที่สำคัญ คือการพัฒนาด้านการขนส่งระบบราง แต่ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งก็คือการเกิดอุบัติเหตุบริเวณถนนที่ตัดผ่านทางรถไฟ ซึ่งในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 มีข่าวการเกิดอุบัติเหตุรถไฟชนกับรถโดยสารรับจ้างไม่ประจำทางซึ่งรถคันดังกล่าวออกเดินทางมาจากจังหวัดสมุทรปราการ เพื่อไปทอดกฐินที่วัดบางปลาหนักในเขตพื้นที่ของจังหวัดฉะเชิงเทรา ทำให้มีผู้เสียชีวิตไม่น้อยกว่า 19 ราย และมีผู้บาดเจ็บมากกว่า 30 ราย [2]

จากเหตุการณ์ดังกล่าว กระทรวงคมนาคมได้ร่วมประชุมหารือเพื่อติดตามสถานการณ์และร่วมกันพิจารณามาตรการเชิงป้องกันและการดำเนินการแก้ไขปัญหาระยะเร่งด่วนและระยะต่อไป อาทิ ในระยะเร่งด่วนการรถไฟแห่งประเทศไทยได้เร่งดำเนินการปรับแก้ไขสัญญาณเตือนให้พร้อมใช้งานและเสนอคณะอนุกรรมการกลั่นกรองการอนุญาตและแก้ไขปัญหาคู่ตัดทางรถไฟกับถนนระดับจังหวัดพิจารณาติดตั้งเครื่องกันอัตโนมัติ ก่อนเสนอคณะกรรมการพิจารณาอนุญาตและดำเนินการติดตั้งต่อไป พร้อมทั้ง

ร่วมกับจังหวัดดำเนินการตรวจสอบจุดตัดทางหลักผ่านในแนวเส้นทางรถไฟทางคู่ที่เกิดอุบัติเหตุ เหตุซ้ำซ้อนที่ถือว่ามีความเสี่ยงสูงและประสานหน่วยงานเจ้าของถนนทางผ่าน ก่อนดำเนินการติดตั้งเครื่องกันอัตโนมัติโดยเร่งด่วนเป็นการชั่วคราว ส่วนในระยะต่อไปการรถไฟแห่งประเทศไทยร่วมกับจังหวัดและชุมชนดำเนินการตรวจสอบจุดตัดทางหลักผ่านที่มีอยู่ในปัจจุบัน พร้อมทั้งประสานหน่วยงานเจ้าของถนนทางผ่าน เพื่อพิจารณาจุดตัดที่จะต้องติดตั้งเครื่องกันทางรถไฟอัตโนมัติ ส่วนทางหลักผ่านขนาดเล็กจะพิจารณาปิดและรวมจุดตัดทางรถไฟเพื่อข้ามทางในจุดที่ปลอดภัยแทน [3] ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการใช้เส้นทางสัญจรร่วมกัน การรถไฟแห่งประเทศไทยและกรมทางหลวงได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาคู่ตัดทางที่เกิดขึ้นบริเวณจุดตัดทางรถไฟอย่างเร่งด่วน แต่การเกิดอุบัติเหตุยังคงทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนมาโดยตลอด [4]

จากผลการศึกษาค้นคว้า พบว่า ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุอันตบตันๆ คือ การไม่ปฏิบัติตามกฎจราจรและการมีอุปกรณ์ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสม ซึ่งการรถไฟแห่งประเทศไทยได้ให้ความสำคัญถึงปัญหานี้ในขณะนี้ จึงเร่งดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์มาตรฐานความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ ป้ายสัญญาณจราจร สัญญาณบนพื้นทางและระบบไฟฟ้าส่องสว่างและจัดสรรงบประมาณเพื่อใช้ในการก่อสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบต่างระดับ ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาลดได้อย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ [5] แต่เนื่องจากการก่อสร้างมีค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่สามารถจัดให้มีทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบต่างระดับหรือทางลอดได้ทุกจุด



ทำให้เกิดอุบัติเหตุรถไฟชนกับรถยนต์บริเวณจุดตัดทางรถไฟอยู่บ่อยครั้ง ทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก [6]

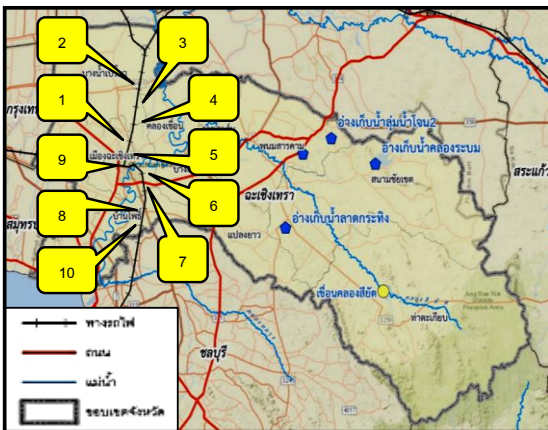
ดังนั้น จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยสนใจที่จะทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพบริเวณจุดตัดทางรถไฟในจังหวัดฉะเชิงเทรา

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพบริเวณจุดตัดทางรถไฟและทำการสำรวจอุปกรณ์ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟกับถนนมีลำดับขั้นตอนดังนี้

2.1 พื้นที่ทำการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลลักษณะทางกายภาพบริเวณจุดตัดทางรถไฟ จำนวน 10 จุด ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการแสดงตำแหน่งจุดตัดทั้ง 10 จุด ซึ่งในแต่ละจุดตัดมีรายชื่อดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งจุดตัดทางรถไฟที่ทำการศึกษา









2.2 การพิจารณาลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวง

หลักเกณฑ์ลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวงของประเทศไทย โดยกรมทางหลวงและการรถไฟแห่งประเทศไทยได้กำหนดหลักเกณฑ์ เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับกำหนดมาตรการอำนวยความสะดวกภัยบริเวณทางรถไฟตัดผ่านทางหลวง สามารถสรุปสาระสำคัญเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟได้ดังนี้ [7]

1. มาตรการความปลอดภัยที่บริเวณทางรถไฟตัดผ่าน ให้ยึดถือค่าคุณควบจรจร [8] คือ ค่าผลคูณระหว่างปริมาณจรจรโดยเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (AADT) กับจำนวนขบวนรถไฟใน 24 ชั่วโมง โดยวางหลักการปฏิบัติในการจัดหาอุปกรณ์และบำรุงรักษาทางหลวงบริเวณทางรถไฟตัดผ่านดังนี้
 - (1) ค่า T.M. น้อยกว่า 10,000 ให้ก่อสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบเสมอระดับและติดตั้งป้ายจรจร
 - (2) ค่า T.M. ระหว่าง 10,000 - 40,000 ให้ก่อสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบเสมอระดับและติดตั้งเครื่องกั้นถนน พร้อมสัญญาณไฟวาบอัตโนมัติและเสียง
 - (3) ค่า T.M. ระหว่าง 40,001 - 100,000 ให้ก่อสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบเสมอระดับและติดตั้งเครื่องกั้นชนิดมีพนักงานปิด-เปิด
 - (4) ค่าคุณควบจรจร (T.M.) มากกว่า 100,000 ให้พิจารณาสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบต่างระดับโดยพิจารณาความเหมาะสมทางเศรษฐกิจในการลงทุน





ตารางที่ 1 รายชื่อจุดตัดทางรถไฟที่ทำการศึกษา

จุดที่	รายชื่อจุดตัดทางรถไฟที่ทำการศึกษา	จุดที่	รายชื่อจุดตัดทางรถไฟที่ทำการศึกษา
1	 เข้าบ้านพักรถไฟ	2	 ฉะเชิงเทรา - บางน้ำเปรี้ยว
3	 มหาจักรพรรดิ	4	 สุขประยูร - บ้านบางไผ่
5	 สุขประยูร - วัดทศราษฎร์	6	 สุขประยูร - พานทอง
7	 พานทอง - วัดดอนทราย	8	 พานทอง - บ้านหนองสระแก



ตารางที่ 1 (ต่อ) รายชื่อจุดตัดทางรถไฟที่ทำการศึกษา

จุดที่	รายชื่อจุดตัดทางรถไฟที่ทำการศึกษา	จุดที่	รายชื่อจุดตัดทางรถไฟที่ทำการศึกษา
9	 พานทอง - บ้านโพธิ์	10	 พานทอง - บ้านหัวฝ้าย

2. ตำแหน่งของจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ (1) อยู่ห่างจากปลายโค้งปากอุโมงค์ สะพาน ช่องเขาของทางรถไฟเป็นระยะไม่น้อยกว่า 2,000 เมตร (2) ทางตัดผ่านเดิมอยู่ใกล้เคียงกับทางตัดผ่านเสมอระดับที่ขอสร้างใหม่ต้องมีระยะห่างกันไม่น้อยกว่า 4,000 เมตร และ (3) ระยะระหว่างสถานีรถไฟให้มีทางตัดผ่านเสมอระดับได้ไม่เกิน 2 แห่ง ถนนขนานทางรถไฟมาตัดทำให้เกิดทางแยกใกล้ทางรถไฟ

3. พื้นผิวทางข้ามบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ (1) สร้างเป็นทางลาดยางหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก ห่างจากศูนย์กลางทางรถไฟออกไปไม่น้อยกว่าข้างละ 40 เมตร และ (2) สภาพพื้นผิวจราจรบริเวณทางตัดผ่านทางรถไฟอยู่ในสภาพชำรุด

4. ความเหมาะสมของบริเวณจุดตัดทางรถไฟในแนวระนาบ ได้แก่ (1) ทางตัดผ่านทางรถไฟกับทางรถไฟทำมุมกัน 90° หรือเกือบ 90° และ (2) ไม่อยู่ใกล้ในช่วงทางโค้งของถนนหรือทางโค้งของทางรถไฟ

5. ความเหมาะสมของบริเวณจุดตัดทางรถไฟในแนวตั้ง ได้แก่ (1) ความกว้างของคันทางต้องไม่เกิน 12 เมตร (2) ต้องสร้างให้เป็นระดับเดียวกับทางรถไฟออกไปไม่น้อยกว่าข้างละ 20 เมตร จากศูนย์กลาง

ทางรถไฟ และ (3) ความกว้างของผิวจราจรไม่เกินกว่า 2 ช่องจราจร

6. ระยะการมองเห็นบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ ไม่มีสิ่งใดบังทัศนวิสัยของพนักงานขับรถและผู้ขับขี่ยานพาหนะบนถนนโดยต้องมองเห็นกันได้ในระยะไม่น้อยกว่า 1,000 เมตร ที่ป้ายหยุดที่มีอยู่ก่อน

7. ป้ายจราจร ได้แก่ (1) มีการติดตั้งป้ายจราจรประเภทเตือน ประเภทบังคับอย่างครบถ้วน (2) ป้ายจราจรประเภทเตือนประเภทบังคับมีระยะห่างจากขอบทางรถไฟตามมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย (3) ป้ายจราจรอยู่ในสภาพที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนในทุกช่วงเวลาทุกสภาวะ (4) ป้ายจราจรถูกบดบังจากสิ่งต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง และ (5) ป้ายจราจรอยู่ในสภาพที่เสื่อมโทรมไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน และสัญลักษณ์บนพื้นผิวถนน ได้แก่ (1) มีเส้นหยุดรถก่อนถึงขอบทางรถไฟ 5 เมตร (2) มีการจัดทำลูกระนาดเพื่อชะลอความเร็ว (3) มีสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็ว (4) มีสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนเข้าสู่เขตทางรถไฟ (5) มีเส้นแบ่งทิศทางการจราจร และ (6) มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางชำรุดหลุดล่อน



8. ระบบไฟฟ้าแสงสว่างบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ (1) มีการติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่างบริเวณจุดตัด (2) ไฟฟ้าส่องสว่างมีสิ่งกีดขวางแสงสว่าง และ (3) แสงไฟมีความสม่ำเสมอ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยุทธนา, อาทิตยา, โชคชัยและธนกร (2557) กล่าวว่า การที่มีลักษณะทางกายภาพบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสมและไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุได้ [9]

กัญญาณัฐ, ประภัสสรและรุจิรา (2559) กล่าวว่า การมีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญอันดับต้นๆ ที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟ [10]

รัฐพงศ์, ชยุดและศุภิสรานนท์ (2564) กล่าวว่า ปัจจัยอันตรายที่สามารถนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายที่สุด คือ การไม่ปฏิบัติตามกฎจราจร รองลงมา คือ การมีอุปกรณ์ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสม และอันดับที่สามเกี่ยวกับความไม่สมบูรณ์ทางด้านร่างกายของผู้ขับขี่ เช่น ตาบอดสี หูตึง เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการศึกษายังพบอีกว่าการบริหารจัดการจุดตัดทางรถไฟและการบำรุงรักษาที่ยังขาดประสิทธิภาพเป็นปัจจัยอันตรายหลักที่เชื่อมโยงไปสู่กลุ่มปัจจัยอันตรายจากอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งเป็นกลุ่มปัจจัยอันตรายที่มีความเสี่ยงสูงที่จะทำให้เกิดอุบัติเหตุที่พบบ่อยที่สุด ณ จุดตัดทางรถไฟ คือ รถไฟชนรถยนต์ [11]

ดังนั้นจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าปัจจัยอันตรายที่นำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟ คือ การไม่ปฏิบัติตามกฎจราจร และการมีอุปกรณ์ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสม

3. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรการอำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

โดยใช้ค่าคุณควบจราจร มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้ในการกำหนดมาตรการอำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรการอำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟ โดยใช้ค่าคุณควบจราจร

จุดตัดทางรถไฟ	จำนวนยานพาหนะที่ผ่านทาง (ข้อมูลมกราคม 2559)	จำนวนขบวนรถไฟใน 24 ชั่วโมง	ค่า T.M.
จุดที่ 1	1,157	80	92,560
จุดที่ 2	7,014	38	266,532
จุดที่ 3	268	80	21,440
จุดที่ 4	1,026	80	82,080
จุดที่ 5	161	80	12,880
จุดที่ 6	359	80	28,720
จุดที่ 7	227	80	18,160
จุดที่ 8	14	80	1,120
จุดที่ 9	1,976	80	158,080
จุดที่ 10	792	80	63,360



จากข้อมูลในตารางที่ 2 สามารถอธิบายผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดังนี้

- จุดที่มีค่า T.M. น้อยกว่า 10,000 มีจำนวน 1 จุด ได้แก่ จุดที่ 8 ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก ค่า T.M. = 1,120
- จุดที่มีค่า T.M. 10,000-40,000 มีจำนวน 4 จุด ได้แก่ จุดที่ 5 ถนนสุขประยูร-วัดทศราษฏร์ ค่า T.M. = 12,880, จุดที่ 7 ถนนพานทอง-วัดดอนทราย ค่า T.M. = 18,160, จุดที่ 3 ถนนมหาจักรพรรดิ ค่า T.M. = 21,440 และจุดที่ 6 ถนนสุขประยูร-พานทอง ค่า T.M. = 28,720
- จุดที่มีค่า T.M. 40,000-100,000 มีจำนวน 3 จุด ได้แก่ จุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่ ค่า T.M. = 63,360, จุดที่ 4 ถนนสุขประยูร-บ้านบางไผ่

ค่า T.M. = 82,080 และจุดที่ 1 ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ ค่า T.M. = 92,560

- จุดที่มีค่า T.M. มากกว่า 100,000 มีจำนวน 2 จุด ได้แก่ จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์ ค่า T.M. = 158,080 และจุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว ค่า T.M. = 266,532

3.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

จากการสำรวจอุปกรณ์อำนวยความสะดวกของกรมทางหลวงที่ติดตั้งบริเวณจุดตัดทางรถไฟ เพื่อใช้ในการพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการสำรวจอุปกรณ์อำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

หลักเกณฑ์ในการพิจารณา	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	จุดที่ 9	จุดที่ 10
	ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ	ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว	ถนนมหาจักรพรรดิ	ถนนสุขประยูร-บ้านบางไผ่	ถนนสุขประยูร-วัดทศราษฏร์	ถนนสุขประยูร-พานทอง	ถนนพานทอง-วัดดอนทราย	ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก	ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์	ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่
- อยู่ห่างจากปลายโค้งปากอุโมงค์ สะพาน ชองเขาของทางรถไฟเป็นระยะไม่น้อยกว่า 2,000 เมตร	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
- ทางตัดผ่านเดิมอยู่ใกล้เคียงกับทางตัดผ่านเสมอระดับที่ขอสร้างใหม่ต้องมีระยะห่างกันไม่น้อยกว่า 4,000 เมตร	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
- ระยะระหว่างสถานีรถไฟให้มีทางตัดผ่านเสมอระดับได้ไม่เกิน 2 แห่ง ถนนขนานทางรถไฟมาตัดทำให้เกิดทางแยกใกล้ทางรถไฟ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

ตารางที่ 3 (ต่อ) ผลการสำรวจอุปกรณ์อำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

หลักเกณฑ์ในการพิจารณา		จุดที่ 1 ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ	จุดที่ 2 ถนนหน้าเชิงเขา-บางน้ำเปรี้ยว	จุดที่ 3 ถนนหน้าจักรพรรดิ	จุดที่ 4 ถนนสุขุมประยูร-บ้านบางไผ่	จุดที่ 5 ถนนสุขุมประยูร-วัดหิมาลัย	จุดที่ 6 ถนนสุขุมประยูร-พานทอง	จุดที่ 7 ถนนพานทอง-วัดดอนทราย	จุดที่ 8 ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก	จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์	จุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่
พื้นผิวทางข้ามบริเวณจุดตัดทางรถไฟ	- สร้างเป็นทางลาดยางหรือคอนกรีตเสริมเหล็กห่างจากศูนย์กลางทางรถไฟออกไปไม่น้อยกว่าข้างละ 40 เมตร	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ความเหมาะสมของบริเวณจุดตัดทางรถไฟในแนวระนาบ	- ทางตัดผ่านทางรถไฟกับทางรถไฟทำมุมกัน 90° หรือเกือบ 90°	x	✓	x	✓	x	✓	x	✓	✓	✓
ความเหมาะสมของบริเวณจุดตัดทางรถไฟในแนวตั้ง	- ไม่อยู่ใกล้ในช่วงทางโค้งของถนนหรือทางโค้งของทางรถไฟ	x	x	x	x	x	✓	x	✓	✓	✓
ระยะการมองเห็นบริเวณจุดตัดทางรถไฟ	- ความกว้างของคันทางต้องไม่เกิน 12 เมตร	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ป้ายจราจรและสัญลักษณ์บนผิวถนน	- ต้องสร้างให้เป็นระดับเดียวกับทางรถไฟออกไปไม่น้อยกว่าข้างละ 20 เมตร จากศูนย์กลางทางรถไฟ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	- ความกว้างของผิวจราจรไม่เกินกว่า 2 ช่องจราจร	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	- ไม่มีสิ่งใดบังทัศนวิสัยของพนักงานขับรถไฟและผู้ขับขี่ยานพาหนะบนถนนโดยต้องมองเห็นกันได้ในระยะไม่น้อยกว่า 1,000 เมตร ที่ป้ายหยุด	x	✓	x	x	x	✓	x	✓	✓	✓
	- มีการติดตั้งป้ายจราจรประเภทเตือน ประเภทบังคับ อย่างครบถ้วน	x	✓	x	x	x	x	x	x	✓	x
ป้ายจราจรและสัญลักษณ์บนผิวถนน	- ป้ายจราจรประเภทเตือนประเภทบังคับมีระยะห่างจากขอบทางรถไฟตามมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย	x	✓	x	x	x	x	x	x	✓	x
	- ป้ายจราจรอยู่ในสภาพที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนในทุกช่วงเวลาทุกสภาวะ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	- ป้ายจราจรไม่ถูกบดบังจากสิ่งต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	- ป้ายจราจรไม่อยู่ในสภาพที่เสื่อมโทรมเหมาะสมต่อการใช้งาน	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

ตารางที่ 3 (ต่อ) ผลการสำรวจอุปกรณ์อำนวยความสะดวกบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

หลักเกณฑ์ในการพิจารณา		จุดที่ 1 ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ	จุดที่ 2 ถนนเข้เชิงเขา-บางน้ำเปรี้ยว	จุดที่ 3 ถนนมหาจักรพรรดิ	จุดที่ 4 ถนนสุขประยูร-บ้านบางไผ่	จุดที่ 5 ถนนสุขประยูร-วัดนครราชสีมา	จุดที่ 6 ถนนสุขประยูร-พานทอง	จุดที่ 7 ถนนพานทอง-วัดดอนทราย	จุดที่ 8 ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก	จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์	จุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่
ป้ายจราจร และสัญลักษณ์ บนผิวถนน	- มีเส้นหยุดรถก่อนถึงขอบทางรถไฟ 5 เมตร	x	✓	x	x	x	x	x	x	✓	x
	- มีการจัดทำลูกระนาดเพื่อชะลอความเร็ว	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	- มีสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็ว	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	- มีสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนเข้าสู่เขตทางรถไฟ	x	✓	x	x	x	x	x	x	✓	x
	- มีเส้นแบ่งทิศทางการจราจร	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	x
- เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชำรุดหลุดล่อน	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
ระบบไฟฟ้าแสง สว่างบริเวณ จุดตัดทางรถไฟ	- มีการติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่างบริเวณจุดตัด	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	- ไฟฟ้าส่องสว่างไม่มีสิ่งกีดขวางแสงสว่าง	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
จุดตัดทางรถไฟ		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

จากข้อมูลในตารางที่ 3 สามารถอธิบายผลการวิเคราะห์ข้อข้อมูลได้ดังนี้

1. ตำแหน่งของจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ (1) อยู่ห่างจากปลายโค้งปากอุโมงค์ สะพาน ช่องเขาของทางรถไฟเป็นระยะไม่น้อยกว่า 2,000 เมตร จากผลการสำรวจ พบว่า ทั้ง 10 จุด อยู่ห่างจากปลายโค้งปากอุโมงค์ สะพาน ช่องเขาของทางรถไฟเป็นระยะไม่น้อยกว่า 2,000 เมตร (2) ทางตัดผ่านเดิมอยู่ใกล้เคียงกับทางตัดผ่านเสมอระดับที่ขอสร้างใหม่ต้องมีระยะห่างกันไม่น้อยกว่า 4,000 เมตร พบว่า ทั้ง 10 จุด มีระยะห่างระหว่างทางรถไฟต่ำกว่า 4,000 เมตร และ (3) ระยะระหว่างสถานีรถไฟให้มีทางตัดผ่านเสมอระดับได้ไม่เกิน 2 แห่ง ถนนขนานทางรถไฟ

มาตัดทำให้เกิดทางแยกใกล้ทางรถไฟ พบว่า ทั้ง 10 จุด มีระยะห่างระหว่างสถานีรถไฟมีทางตัดผ่านเสมอระดับเกิน 2 แห่ง

2. พื้นผิวทางข้ามบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ (1) สร้างเป็นทางลาดยางหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก ห่างจากศูนย์กลางทางรถไฟออกไปไม่น้อยกว่าข้างละ 40 เมตร จากผลการสำรวจ พบว่า ทั้ง 10 จุด มีการสร้างเป็นทางลาดยางหรือคอนกรีตเสริมเหล็กห่างจากศูนย์กลางทางรถไฟออกไปไม่น้อยกว่าข้างละ 40 เมตร และ (2) สภาพพื้นผิวจราจรบริเวณทางตัดผ่านทางรถไฟอยู่ในสภาพชำรุด พบว่า มีเพียงจุดที่ 3 ถนนมหาจักรพรรดิที่มีการชำรุดของผิวจราจรขรุขระเป็นหลุมบ่อ



3. ความเหมาะสมของบริเวณจุดตัดทางรถไฟในแนวระนาบ ได้แก่ (1) ทางตัดผ่านทางรถไฟกับทางรถไฟทำมุมกัน 90° หรือเกือบ 90° จากผลการสำรวจพบว่า มีทางตัดผ่านกับทางรถไฟทำมุมกัน 90° หรือเกือบ 90° ได้แก่ จุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว, จุดที่ 4 ถนนสุขประยูร-บ้านบางไผ่, จุดที่ 6 ถนนสุขประยูร-พานทอง, จุดที่ 8 ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก, จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์และจุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่ส่วนจุดที่ไม่ทำมุมกัน 90° ได้แก่ จุดที่ 1 ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ, จุดที่ 3 ถนนมหาจักรพรรดิ, จุดที่ 5 ถนนสุขประยูร-วัดทศราษฎร์ และจุดที่ 7 ถนนพานทอง-วัดดอนทราย และ (2) ไม่อยู่ใกล้ในช่วงทางโค้งของถนนหรือทางโค้งของทางรถไฟ พบว่า จุดที่ไม่อยู่ใกล้กับทางโค้ง ได้แก่ จุดที่ 6 ถนนสุขประยูร-พานทอง, จุดที่ 8 ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก, จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์ และจุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่

4. ความเหมาะสมของบริเวณจุดตัดทางรถไฟในแนวตั้ง ได้แก่ (1) ความกว้างของคันทางต้องไม่เกิน 12 เมตร (2) ต้องสร้างให้เป็นระดับเดียวกับทางรถไฟออกไปไม่น้อยกว่าข้างละ 20 เมตร จากศูนย์กลางทางรถไฟ และ (3) ความกว้างของผิวจราจรไม่เกินกว่า 2 ช่องจราจร จากผลการสำรวจ พบว่า ทั้ง 10 จุด มีความเหมาะสมของบริเวณจุดตัดในแนวตั้ง

5. ระยะเวลามองเห็นบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ได้แก่ ไม่มีสิ่งใดบังทัศนวิสัยของพนักงานขับรถและผู้ขับขี่ยานพาหนะบนถนนโดยต้องมองเห็นกันได้ในระยะไม่น้อยกว่า 1,000 เมตร ที่ป้ายหยุดที่มีอยู่ก่อน จากผลการสำรวจ พบว่า จุดตัดที่มีระยะมองเห็นปลอดภัยเพียงพอ ได้แก่ จุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว

, จุดที่ 6 ถนนสุขประยูร-พานทอง, จุดที่ 8 ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก, จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์และจุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่ และจุดตัดที่ระยะมองเห็นปลอดภัยไม่เพียงพอ ได้แก่ จุดที่ 1 ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ, จุดที่ 3 ถนนมหาจักรพรรดิ, จุดที่ 4 ถนนสุขประยูร-บ้านบางไผ่, จุดที่ 5 ถนนสุขประยูร-วัดทศราษฎร์ และจุดที่ 7 ถนนพานทอง-วัดดอนทราย

6. ป้ายจราจร ได้แก่ (1) มีการติดตั้งป้ายจราจรประเภทเตือน ประเภทบังคับอย่างครบถ้วน (2) ป้ายจราจรประเภทเตือนประเภทบังคับมีระยะห่างจากขอบทางรถไฟตามมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย (3) ป้ายจราจรอยู่ในสภาพที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนในทุกช่วงเวลาทุกสภาวะ (4) ป้ายจราจรไม่ถูกบดบังจากสิ่งต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง และ (5) ป้ายจราจรไม่อยู่ในสภาพที่เสื่อมโทรมเหมาะสมต่อการใช้งาน จากผลการสำรวจ พบว่า จุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว และจุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์ มีการติดตั้งป้ายจราจรประเภทเตือน ประเภทบังคับ อย่างครบถ้วนและป้ายจราจรประเภทเตือน ประเภทบังคับ มีระยะห่างจากขอบทางรถไฟตามมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย ส่วนที่เหลืออีก 8 จุด การติดตั้งป้ายจราจรไม่เป็นไปตามที่กำหนด และสัญลักษณ์บนพื้นผิวถนน ได้แก่ (1) มีเส้นหยุดรถก่อนถึงขอบทางรถไฟ 5 เมตร (2) มีการจัดทำลูกกระพรวนเพื่อชะลอความเร็ว (3) มีสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็ว (4) มีสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนเข้าสู่เขตทางรถไฟ (5) มีเส้นแบ่งทิศทางการจราจร และ (6) เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชำรุดหลุดล่อน พบว่า ทั้ง 10 จุด ไม่มีสัญลักษณ์บน



พื้นที่ทางเดินให้ลดความเร็วและไม่มีการจัดทำลูก
ระนาดเพื่อชะลอความเร็วบนพื้นทาง

7. ระบบไฟฟ้าแสงสว่างบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
ได้แก่ (1) มีการติดตั้งไฟฟ้าส่องสว่างบริเวณจุดตัด
(2) ไฟฟ้าส่องสว่างไม่มีสิ่งกีดขวางแสงสว่าง และ
(3) แสงไฟมีความสม่ำเสมอ จากผลการสำรวจ พบว่า
ทั้ง 10 จุด มีระบบไฟฟ้าส่องสว่างบริเวณจุดตัดอย่าง
เพียงพอและไม่มีสิ่งกีดขวางแสงสว่าง

4. สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรการอำนวยความสะดวก ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรการอำนวยความสะดวก
ความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ โดยใช้ค่า T.M. มา
ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและนำค่าที่คำนวณได้มา
เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของค่า T.M. ดังแสดง
ในตารางที่ 4

จากข้อมูลในตารางที่ 4 สามารถสรุปผลการ
วิเคราะห์ข้อมูลได้ดังนี้

1. ค่า T.M. น้อยกว่า 10,000 ได้แก่ จุดที่ 8 ถนน
พานทอง-บ้านหนองสระแก ค่า T.M. = 1,120 โดยทำ
การเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ค่า T.M. ตาม
หลักเกณฑ์ลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟ
กับทางหลวง พบว่า ควรมีการก่อสร้างทางหลวงผ่าน
ข้ามทางแบบเสมอระดับและติดตั้งป้ายจราจร

2. ค่า T.M. 10,000-40,000 ได้แก่ จุดที่ 5 ถนนสุข
ประยูร-วัดทศราษฏร์ ค่า T.M. = 12,880, จุดที่ 7
ถนนพานทอง-วัดดอนทราย ค่า T.M. = 18,160, จุดที่
3 ถนนมหาจักรพรรดิ ค่า T.M. = 21,440 และ จุดที่ 6
ถนนสุขประยูร-พานทอง ค่า T.M. = 28,720 โดยทำ

การเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ค่า T.M.
ลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทาง
หลวง พบว่า ควรมีการก่อสร้างทางหลวงผ่านข้ามทาง
รถไฟแบบเสมอระดับและติดตั้งเครื่องกั้นถนนพร้อม
สัญญาณไฟวาบอัตโนมัติ

3. ค่า T.M. 40,001-100,000 ได้แก่ จุดที่ 10 ถนน
พานทอง-บ้านหัวไผ่ ค่า T.M. = 63,360, จุดที่ 4 ถนน
สุขประยูร-บ้านบางไผ่ ค่า T.M. = 82,080 และจุดที่ 1
ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ ค่า T.M. = 92,560 โดยทำการ
เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ค่า T.M. ลักษณะทาง
กายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวง พบว่า ควร
มีการก่อสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบเสมอระดับ
และติดตั้งเครื่องกั้นถนนชนิดมีพนักงานเปิด-ปิด

4. ค่า T.M. มากกว่า 100,000 ได้แก่ จุดที่ 9 ถนน
พานทอง-บ้านโพธิ์ ค่า T.M. = 158,080 และจุดที่ 2
ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว ค่า T.M. = 266,532
โดยทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ค่า T.M.
ลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทาง
หลวง พบว่า ควรก่อสร้างเป็นทางผ่านข้ามทางรถไฟ
แบบต่างระดับโดยให้พิจารณาตามความเหมาะสม ซึ่ง
ปัจจุบันรัฐบาลได้พิจารณาอนุมัติงบประมาณเพื่อใช้ใ
นการก่อสร้างสะพานแบบต่างระดับผ่านข้ามทางรถไฟ
แล้วทั้ง 2 จุด โดยจุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์ ใช้
งบประมาณในการก่อสร้าง 193 ล้านบาท และจุดที่ 2
ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว ใช้งบประมาณในการ
ก่อสร้าง 139 ล้านบาท



ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรการอำนวยความสะดวกภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟกับถนน

มาตรฐาน ค่า T.M.	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรการอำนวยความสะดวกภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟกับถนน	
ค่า T.M. น้อยกว่า 10,000	จุดที่ 8 ถนนพานทอง-บ้านหนองสระแก	T.M.=1,120
	จากค่า T.M. ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานตามหลักเกณฑ์ลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวง พบว่า ควรมีการก่อสร้างทางหลวงผ่านข้ามทางแบบเสมอระดับและติดตั้งป้ายจราจร	
ค่า T.M. 10,000-40,000	จุดที่ 5 ถนนสุขประยูร-วัดทศราษฏร์	T.M.=12,880
	จุดที่ 7 ถนนพานทอง-วัดดอนทราย	T.M.=18,160
	จุดที่ 3 ถนนมหาจักรพรรดิ	T.M.=21,440
	จุดที่ 6 ถนนสุขประยูร-พานทอง	T.M.=28,720
	จากค่า T.M. ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวง พบว่าควรมีการก่อสร้างทางหลวงผ่านข้ามทางรถไฟแบบเสมอระดับและติดตั้งเครื่องกั้นถนนพร้อมสัญญาณไฟวาบอัตโนมัติ	
ค่า T.M. 40,001-100,000	จุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่	T.M.=63,360
	จุดที่ 4 ถนนสุขประยูร-บ้านบางไผ่	T.M.=82,080
	จุดที่ 1 ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ	T.M.=92,560
	จากค่า T.M. ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวง พบว่าควรมีการก่อสร้างทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบเสมอระดับและติดตั้งเครื่องกั้นถนนชนิดมีพนักงานปิด-เปิด	
ค่า T.M. มากกว่า 100,000	จุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์	T.M.=158,080
	จุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว	T.M.=266,532
จากค่า T.M. ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟกับทางหลวง พบว่าควรก่อสร้างเป็นทางผ่านข้ามทางรถไฟแบบต่างระดับโดยให้พิจารณาตามความเหมาะสม		

4.2 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลในการพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกภัยของกรมทางหลวงที่ติดตั้งบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ดังแสดงในตารางที่ 5 จากข้อมูลในตารางที่ 5 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดังนี้

จุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำเปรี้ยว และจุดที่ 9 ถนนพานทอง-บ้านโพธิ์ มีการติดตั้งป้ายเตือน ป้ายบังคับ มีเส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร และมีระบบไฟฟ้าแสงสว่างเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ส่วนลูกระนาดเพื่อชะลอความเร็วและสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ส่วนที่เหลืออีก 8 จุด การติดตั้งป้ายเตือน ป้ายบังคับ เส้นหยุดรถก่อน



ตารางที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลในการพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก

รายชื่อ จุดตัดทางรถไฟ	การติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก
จุดที่ 1 ถนนเข้าบ้านพักรถไฟ	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา -บางน้ำเปรี้ยว	ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 3 ถนนมหาจักรพรรดิ	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 4 ถนนสุขประยูร -บ้านบางไผ่	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 5 ถนนสุขประยูร -วัดทศราษฏร์	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 6 ถนนสุขประยูร -พานทอง	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 7 ถนนพานทอง -วัดดอนทราย	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 8 ถนนพานทอง -บ้านหนองสระแก	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 9 ถนนพานทอง -บ้านโพธิ์	ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ
จุดที่ 10 ถนนพานทอง-บ้านหัวไผ่	ป้ายเตือน, ป้ายบังคับ, เส้นหยุดรถก่อนถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร, ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว, สัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

ถึงขอบรางรถไฟ 5 เมตร ลูกกระพาดเพื่อชะลอความเร็ว และสัญลักษณ์บนพื้นทางเตือนให้ลดความเร็วก่อนถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจากปัญหาการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่ไม่เหมาะสมและไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ทำ

ให้เกิดอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของยุทธนา, อาทิตยา, โชคชัยและธนกร พบว่า การที่มีลักษณะทางกายภาพบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสมและไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่



สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุได้ และผลการศึกษาวิจัยของ ทัศนวิสัย, ประสิทธิภาพ และรูจรรยา พบว่า การมีอุปกรณ์ อำนาจความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ไม่ เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญอันดับต้นๆ ที่ทำให้เกิด อุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

4.3 ข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ สามารถ เสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาบริเวณจุดตัด ทางรถไฟกับถนนดังนี้

4.3.1 การสร้างจุดตัดทางรถไฟเป็นทางต่างระดับ

จากสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรการ อำนาจความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟกับถนน โดยใช้ค่า T.M. มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลและนำค่าที่ คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของ ค่า T.M. พบว่า บริเวณที่มีค่า T.M. มากกว่า 100,000 และเป็นบริเวณทางผ่านทางรถไฟระดับเดียวกันกับ ทางหลวง มีจำนวน 2 จุด ได้แก่ จุดที่ 9 ถนนพนา ทอง-บ้านโพธิ์ และ จุดที่ 2 ถนนฉะเชิงเทรา-บางน้ำ เปรี้ยว ควรพิจารณาดำเนินการก่อสร้างสะพานข้าม ผ่านทางรถไฟแบบต่างระดับ เนื่องจากมีค่า T.M. มากกว่า 100,000

4.3.2 การติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก ของกรมทางหลวงในบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

อุปกรณ์อำนวยความสะดวกของกรมทาง หลวงที่ติดตั้งบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ควรทำการติดตั้ง ให้ครบทั้ง 10 จุด โดยเสนอให้มีการตั้งงบประมาณและ เร่งดำเนินการตามแผนงานในการแก้ไขปัญหาจุดตัด รถไฟบริเวณที่มีอุบัติเหตุบ่อยครั้งเป็นลำดับแรกก่อน

4.3.3 การพิจารณาลดทางตัดผ่าน

ปัจจุบันมีทางตัดผ่านเพิ่มมากขึ้นแบบลักษณะ ทางลักผ่าน ซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องไม่ได้รับการ จัดสรรงบประมาณในการดำเนินงาน ทำให้การ ดำเนินการล่าช้าและหยุดชะงัก มีการพิจารณารูปแบบ แก้ไขปรับเปลี่ยน มีความล่าช้าในการแจ้งค่าใช้จ่ายใน การติดตั้งเครื่องกั้นถนน จึงเกิดเป็นทางลักผ่านขึ้น และในจุดตัดทางรถไฟเดิมก็ไม่สามารถปิดทางลักผ่าน ได้ เนื่องจากปัญหามวลชนในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ คัดค้าน ติดปัญหาเวนคืนที่ดินบริเวณที่ขออนุญาต เป็นต้น อย่างไรก็ตามจากการสำรวจและทบทวน จุดตัดทางรถไฟใหม่ พบว่า มีทางลักผ่านเพิ่มขึ้นซึ่งไม่ มีการควบคุมด้านความปลอดภัยและยากต่อการ ควบคุมให้อยู่ในมาตรฐานความปลอดภัย ดังนั้นด้าน นโยบายจึงต้องขอความร่วมมือกระทรวงมหาดไทย และหน่วยงานท้องถิ่น ติดตาม กำกับดูแลไม่ให้เกิด จุดตัดทางรถไฟลักษณะทางลักผ่านเพิ่มขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] http://www.cco.chachoengsao.go.th/images/pp pl/plan_ccs65.pdf. (Accessed on 15 April 2022)
- [2] https://www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/ppp parbud/ewt_dl_link.php?nid=680. (Accessed on 1 April 2022)
- [3] J. Jarusirisombat, Safety problems at railroad intersection, traffic signs without protection system, Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2009. (in Thai)



- [4] http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2564/E/159/T_0031.PDF. (Accessed on 28 April 2022)
- [5] <https://www.datagov.mot.go.th/dataset/number-of-rail-accidents-in-country-from-2015-to-2019>. (Accessed on 20 December 2021)
- [6] A. Patthanawat, R. Changchua, A. Upyokin and W. Wichitpongsa, Safety examination of railway intersections controlled by traffic signs: Study route. Pa Sao station to Saraphi station, Thesis, Chiang Mai University, Thailand, 2012. (in Thai)
- [7] http://bhs.doh.go.th/files/Train/train_63.pdf. (Accessed on 19 April 2022)
- [8] http://bhs.doh.go.th/files/Train/train_6.pdf. (Accessed on 1 May 2022)
- [9] Y. Nonsrichai, A. Nimanong, C. Padthama and T. Watthanasombatkul, Guidelines for improving physical characteristics at railway intersections: A case study of railway intersection in Prachinburi Province, The 19th National Convention on Civil Engineering, Proceeding, 2014, 2483-2495. (in Thai)
- [10] K. Sukonnakhon, P. Tanheng and R. Ninsonthi, Study of physical characteristics at railway intersection, Thesis, Rajabhat Rajanagarindra University, Thailand, 2016. (in Thai)
- [11] R. Meesit, C. Aphichavanungul and S. Reangsen, Railway level crossing accident analysis using network theory, Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal, 2021, 7(2), 82-93. (in Thai)

ผลกระทบของปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดของวัสดุเชิงประกอบโดยการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล

ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร^{1*} ชาตรี หอมเขียว^{1,2} และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 มิถุนายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 4 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 29 พฤศจิกายน 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ: การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) ถูกใช้เพื่อหาผลกระทบของปัจจัยการทดลอง (ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก) และสภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) โดยมีส่วนผสม คือ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) ปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) และขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ปริมาณ 40 wt% ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมด้วยกระบวนการอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Extrusion) และการอัดร้อน (Compression Molding Machine) ผลการทดลองทั้ง 24 สภาวะการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) จากผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยทั้งหมดในการทดลองมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กล่าวคือ เมื่อความเร็วรอบของการกัดเพิ่มขึ้นจาก 220 ถึง 720 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลงอย่างชัดเจน และเมื่ออัตราป้อนและระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs ทุกสภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มิลลิเมตร/นาที และระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

คำสำคัญ: การทดลองแบบไอ-ออปติมอล; โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง; ขี้เลื่อยไม้ยางพารา; ค่าความขรุขระผิว; พื้นผิวตอบสนอง

Effect of Factors and Optimal Condition in Milling Process of Composites Using I-Optimal Experimental Design

Chainarong Srivabut^{1*}, Chatree Homkhiew^{1,2} and Surasit Rawangwong^{1,2}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author, E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

Received: 3 June 2022; Revised: 4 November 2022; Accepted: 29 November 2022

Online Published: 26 December 2022

Abstract: The I-Optimal experimental design was used to study the effect of factors (speed, feed rate, and depth of cut) and optimal condition on the surface roughness of wood-plastic composites (WPCs). Mixture ratios were high-density polyethylene (HDPE) with 60 percent by weight (wt%) and rubberwood sawdust (RWS) with 40 wt%. The WPC samples were prepared from the extrusion and compression molding machine. The experimental results were evaluated using analysis of variance (ANOVA) and optimized using response surface methodology (RSM). The results displayed that all of the factors significantly ($p < 0.05$) affected on surface roughness of WPCs. The increased speed from 220 to 720 rpm resulted in a decrease for surface roughness values. In addition, it found that the increased feed rate and depth of cut resulted in increase for surface roughness values. The optimal condition for side and face milling of WPCs for all of the conditions was 720 rpm speed, 200 mm/min feed, and 3 mm depth of cut, respectively.

Keywords: I-Optimal design; High-density polyethylene; Rubberwood sawdust; Surface roughness; Response surface methodology



1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ปราศจากเชื้อรา และปลอดภัยจากแมลงต่างๆ [1, 2] กระบวนการขึ้นรูป WPCs สามารถกระทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น วัสดุโครงสร้างจะมีการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด (Extrusion) หรือการอัดร้อน (Hot Press) และหากเป็นผลิตภัณฑ์ของใช้ทั่วไปจะมีการขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection Molding) เป็นต้น [3, 4] อัตราส่วนและสภาวะของการผสม WPCs ขึ้นอยู่กับวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) สารเสริมแรง (Reinforcement) และส่วนประกอบอื่นๆ ที่นำมาผสม นอกจากนี้ อาจจะมีสารเติมแต่งเพื่อช่วยในการผสมเพื่อให้ WPCs มีสมบัติที่ดีขึ้นตามความต้องการของผู้ผลิต WPCs มีข้อดีหลายประการ เช่น มีความทนทาน มีต้นทุนการผลิตและบำรุงรักษาต่ำ ดูดซับน้ำน้อย ด้านทานเชื้อราสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5]

การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) คือ การออกแบบการทดลองแบบครั้งเดียวหรือแบบต่อเนื่องโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรหรือปัจจัยนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่จะศึกษา เช่น สัดส่วนการผสม [6, 7] เป็นต้น โดยปัจจัยนำเข้าจากการศึกษานั้นจะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือผลตอบสนอง (Output or Response) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ตัวแปร (ปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables) หรือ

ตัวแปร (ปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables) และตัวแปร (ปัจจัย) ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Variables) ตามลำดับ [8]

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) ของผลการทดลอง เป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลเชิงสถิติเพื่อจะช่วยให้การสรุปผลที่ได้เหมาะสมกับเหตุและผล โดยการทดลองจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางวิชาการมากกว่าการสรุปผลเชิงพรรณนา โดยมีเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) โดยเปรียบเทียบปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อการทดลองจากการตั้งสมมติฐาน [9, 10] นอกจากนี้ ยังใช้การวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมของการทดลองโดยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลการตอบสนองโดยการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือปัจจัยนำเข้าที่กำหนด [11, 12] โดยทำการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟหรืออาจนำเสนอในรูปแบบจำลอง (Empirical Models) ซึ่งผลคำตอบจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบที่มีนัยสำคัญกับผลการตอบสนอง (Response) และควรตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลอง (Residual Analysis) และตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) [8, 13]

ผลิตภัณฑ์ของ WPCs ที่เข้ามามีบทบาทในเชิงอุตสาหกรรม คือ การแทนที่ไม้จากธรรมชาติ เนื่องจากมีสมบัติในการใช้งานที่ดีกว่าไม้หลายประการ และสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนายังมีการใช้ในงานวัสดุก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการใช้



วัสดุทดแทนนั้นยังให้ความสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระแสโลกร้อน จึงทำให้ WPCs เข้ามาทดแทนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแบบเดิมๆ [14, 15] อย่างไรก็ตามเมื่อมีการนำ WPCs มาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างแล้ว โดยทั่วไปจำเป็นต้องเลือกลักษณะรูปทรงของวัสดุเพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งาน ซึ่ง WPCs โดยทั่วไปแล้วจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น ซึ่งยังไม่มีหลากหลายของรูปทรงในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการนำผลิตภัณฑ์ WPCs ไปใช้ประโยชน์ให้มีความหลากหลายมากขึ้นจำเป็นต้องแปรรูป WPCs ให้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันไป และเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานและความต้องการของผู้บริโภค อีกทั้งการขึ้นรูปให้มีส่วนโค้ง เว้า และรูปทรงต่างๆ โดยกระบวนการกัด (Milling) เป็นต้น [5, 16] ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลและกายภาพของชิ้นงาน ดังนั้น ในกระบวนการผลิตหรือการแปรรูป WPCs ให้มีรูปร่างตามที่ต้องการและยังคงไว้ซึ่งสมบัติที่ดีของวัสดุจึงเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญและจำเป็นต้องศึกษา [17, 18]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งมีส่วนผสมคือ พอลิเอธิลีนและผงไม้ยางพารา โดยวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้งานจากวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต โดยทำการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล โดยวิธีการนี้เป็นวิธีการที่น่าสนใจและยังมีการศึกษาที่น้อย จากนั้น ทำการศึกษาผลกระทบต่อความขรุขระผิว (Ra) ของ WPCs ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึก จากกระบวนการกัด

ด้านข้างและด้านหน้าของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จาก WPCs ที่มีผิวชิ้นงานที่ดีและมีคุณภาพเหมาะแก่การประยุกต์ใช้ WPCs ให้มีความหลากหลายมากขึ้น

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกติกและไม้ มีส่วนผสมของวัสดุ 2 ชนิด คือ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) ปริมาณ 60 wt% ทำหน้าที่เป็นวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) และขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ปริมาณ 40 wt% ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับพลาสติก ก่อนการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 Mesh (<250 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น ทำการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม. [2] ตามลำดับ

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Experimental Design) โดยใช้โปรแกรม Design Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) ซึ่งกำหนดปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และระยะกินลึก (Depth of Cut) [17] โดยมีระดับของสภาวะทั้งหมด 24 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งระดับของสภาวะในการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรมและการทำการทดลองเบื้องต้น (Pre-Lab)



ตารางที่ 1 ระดับของสภาวะในการทดลองสำหรับการกัด WPCs

Factors	(-1)	(0)	(+1)
Speed (A) (rpm)	220	480	720
Feed Rate (B) (mm/min)	200	300	400
Depth of Cut (C) (mm)	3	5	7

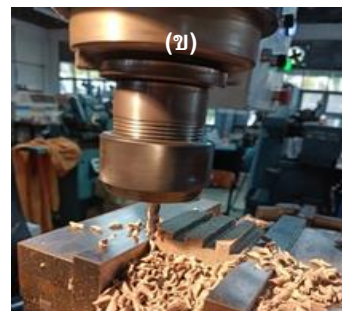
2.3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ

กระบวนการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs มี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ (1) ขั้นตอนการผสม โดยนำส่วนผสมทั้ง 2 ชนิด คือ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ปริมาณ 60 wt% และซีลีโยไมยางพารา ปริมาณ 40 wt% ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ (Twin-Screw Extruder) โดยมีช่วงอุณหภูมิในการผสมระหว่าง 160-190 °C อัตราป้อน 50 รอบ/นาที แรงดัน 0.1 MPa ตามลำดับ และ (2) ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยการนำเม็ด WPCs มาทำการอัดด้วยเครื่องอัดร้อน (Compression Molding Machine) โดยมีขนาดชิ้นงานตัวอย่าง คือ 100 × 100 × 30 mm³ (กว้าง × ยาว × หนา) โดยมีอุณหภูมิในการอัดร้อน 180 °C แรงดัน 6.89 MPa เป็นเวลา 15 นาที และทำการหล่อเย็นด้วยอากาศ เป็นเวลา 5 นาที [2, 10] ตามลำดับ จะได้ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ในกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs และใช้ในการวัดค่าความขรุขระผิวต่อไป

2.4 กระบวนการกัดด้านหน้าและด้านข้างของ WPCs

กระบวนการกัดด้านหน้าและด้านข้างของ WPCs ทำการทดสอบด้วยเครื่องกัดกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ ObraeciStrojie รุ่น FGV32 (ประเทศเยอรมัน) ช่วงของความเร็วรอบ 45 - 2,000 รอบ/นาที ช่วงของอัตราป้อนตามขั้นของเฟืองทดโต๊ะงาน 14 - 900 มม./นาที แสดงดังรูปที่ 1

เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นดอกเอ็นมิล (End Mill) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 และ 16 มม. จำนวน 4 คมตัด ยี่ห้อ S.A.P. (ประเทศไทย) โดยมี Helix Angle คือ 30 องศา ค่า Corner Radius คือ 5 มม. ค่า Overall Length คือ 100 มม. และ ค่า Neck Length คือ 30 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 1 (ก) เครื่องกัดแบบกึ่งอัตโนมัติและ (ข) กระบวนการกัดชิ้นงานตัวอย่าง



2.5 การทดสอบความขรุขระผิวของ WPCs

การวัดค่าเฉลี่ยของความขรุขระผิวของชิ้นงาน (Average Roughness; Ra) โดยทำการวัดบนผิวชิ้นงานทดสอบ สำหรับการทดลองนี้จะทำการวัดความขรุขระผิวด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs เป็นระยะทาง 10 มม. โดยกำหนดจุดวัดทั้งหมด 3 จุด คือ ที่ระยะห่างจากขอบของชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน จำนวน

2 จุด และที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน จำนวน 1 จุด และมีค่า Cut-off Length คือ 0.8 มม. โดยใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อมิตูโตโย รุ่น SJ-210 (ประเทศไทย) และทำการวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกัด โดยในแต่ละค่าของสภาวะทดลองจะวัด 5 ซ้ำ โดยค่าเฉลี่ยของ Ra แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและค่าการตอบสนองของแต่ละสภาวะการทดลอง

Run	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Ra (μm)			
				Side Milling		Face Milling	
				End Mill 12	End Mill 16	End Mill 12	End Mill 16
1	220	200	3	2.933	3.111	4.096	5.261
2	480	400	7	3.041	2.928	4.058	5.119
3	480	300	3	2.689	2.813	3.827	4.863
4	480	200	3	2.642	2.619	3.863	4.818
5	720	200	5	2.471	2.874	3.212	4.912
6	220	300	5	3.308	3.268	4.413	5.763
7	220	200	5	3.009	3.171	4.194	5.641
8	720	300	3	2.637	2.882	3.391	5.129
9	480	400	3	3.014	2.857	4.023	4.932
10	720	400	7	2.921	3.153	3.853	5.324
11	220	300	3	3.001	3.182	4.327	5.389
12	720	400	5	2.879	3.096	3.628	5.268
13	220	400	3	3.043	3.248	4.332	5.421
14	480	300	7	2.981	2.912	4.013	5.012
15	480	300	5	2.846	2.883	3.968	4.923
16	480	200	7	2.843	2.746	3.967	4.947
17	220	400	5	3.282	3.291	4.578	5.681
18	480	200	5	2.724	2.682	3.954	4.877
19	720	300	5	2.659	2.986	3.512	5.188
20	720	300	7	2.762	3.057	3.566	5.243
21	720	200	7	2.548	2.953	3.341	5.051
22	720	400	3	2.832	2.946	3.821	5.209
23	220	200	7	2.849	3.294	4.287	5.814
24	220	400	7	3.386	3.341	4.641	5.817



2.6 การทดสอบเชิงกลของ WPCs

ก่อนการทดลองกักชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของ WPCs ประกอบด้วย แรงดึง (ASTM D638) แรงดัด (ASTM D790) แรงอัด (ASTM D6108) และความแข็ง (ASTM D2240) ตามลำดับ ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของ WPCs

Tensile (MPa)	Flexural (MPa)	Compressive (MPa)	Hardness
20.05	34.86	22.43	76.50
0.18*	0.98*	0.15*	0.32*

หมายเหตุ: * คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Experimental Design) เพื่อหาผลกระทบของปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง โดยนำไปสู่การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทางสถิติ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ของผลการทดลอง การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Model) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความขรุขระผิวที่น้อยที่สุด โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทำนาย (Prediction) และผลที่ได้จากการวัดค่าจริง (Observed) จากการทดลองของ WPCs

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

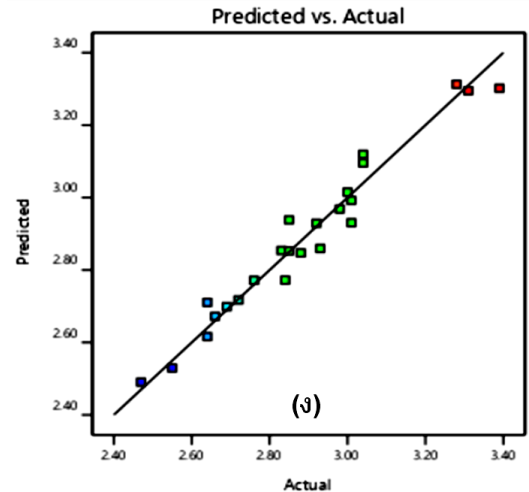
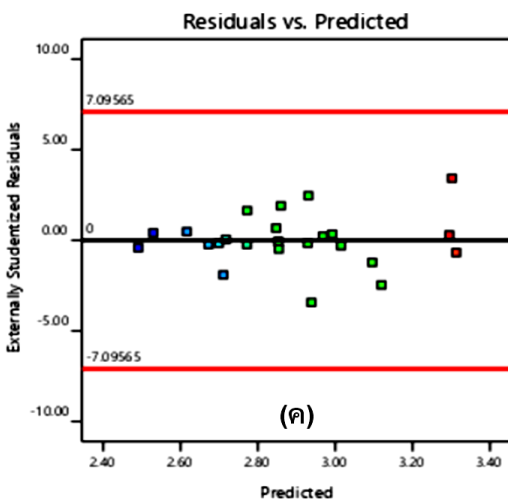
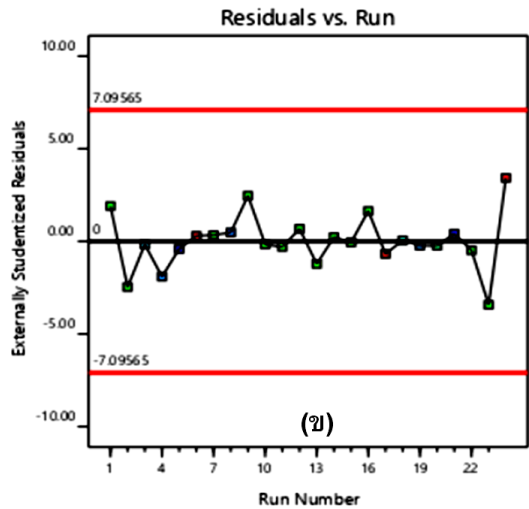
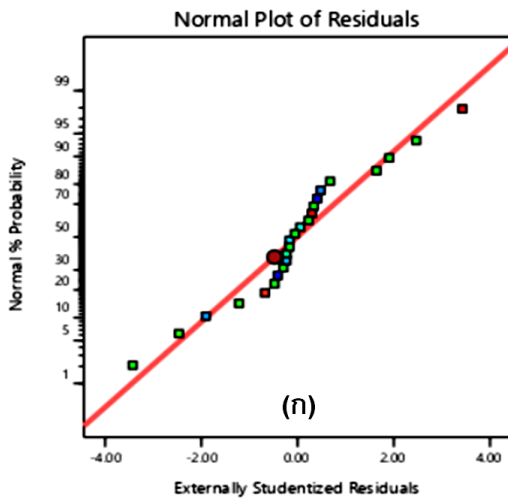
3.1 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Checking)

การตรวจสอบความเพียงพอของข้อมูลถูกวิเคราะห์เพื่อยืนยันความถูกต้องและแม่นยำของการออกแบบการทดลอง โดยยกตัวอย่างการวิเคราะห์ความเพียงพอของข้อมูลความขรุขระผิวในการกักชิ้นข้าง โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. แสดงดังรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2 (ก) คือ กราฟแสดงความเป็นปกติของข้อมูล (Normal Probability) พบว่า การกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติ ตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรง (มีแนวโน้มแสดงเป็นเส้นตรง) และไม่พบค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้น สรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 2 (ข) คือ กราฟแสดงค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) พบว่า ค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้น สรุปได้ว่า ข้อมูลของการทดลองทั้ง 2 ส่วนเป็นอิสระต่อกัน รูปที่ 2 (ค) คือ กราฟแสดงค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted) จะเห็นได้ว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวของข้อมูลนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ และค่าเศษเหลือมีการกระจายอยู่รอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และรูปที่ 2 (ง) คือ กราฟแสดงค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs. Actual) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทำนายโดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง พบว่า ข้อมูลมี



ความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งสมการการถดถอยเหล่านี้สามารถทำนายค่าจากการทดลองได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำข้อมูลจากการทำนายไปใช้เพื่อคาดการณ์ผลลัพธ์ในอนาคตได้

ดังนั้น จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 กราฟ จะเห็นได้ว่าข้อมูลเหล่านี้มีความเพียงพอกับการทดลองและสามารถนำไปใช้ในการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมได้



รูปที่ 2 การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบจำลองการถดถอย:

- (ก) กราฟความเป็นปกติของข้อมูล (ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง
- (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ง) กราฟค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง



3.2 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs แสดงดังตารางที่ 4 โดยยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดด้านข้างโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. พบว่า R-Square (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9347 และ Adjusted R-Square (Adj- R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9116 ซึ่งมีค่าสูงและใกล้เคียงกันสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมต่อการทดลอง และค่าความขรุขระผิวมีผลกระทบจากปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึก มีค่า 93.47% และ 91.16% ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าทั้ง 2 ควรจะมีค่าเกิน 0.7500 หรือ 75.00% นอกจากนี้ Predicted-Square (Pred- R^2) มีค่าเท่ากับ 0.8719 หรือ 87.19% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า R^2 และ Adj- R^2 เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า จำนวนข้อมูลในการทดลองมีเพียงพอต่อการใช้ในการทำนายโดยมีความน่าเชื่อถือเท่ากับ 87.19% นอกจากนี้ค่า Coefficients of Variation (C.V.) ของทุกสภาวะการทดลอง มีค่าอยู่ระหว่าง 3.19-4.31% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่า C.V. ควรจะมีค่าต่ำกว่า 10% แสดงให้เห็นว่า การทดลองมีการตรวจวัดสมบัติของวัสดุที่มีความถูกต้องและแม่นยำที่ดี [16, 17]

3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการการถดถอยที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวสำหรับการกัดด้านข้างของ WPCs

จากผลการตรวจสอบความเพียงพอของข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลการวัดค่าความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษามีผลต่อค่าความขรุขระผิวหรือไม่ โดยกำหนดที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($P < 0.05$) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert แสดงดังตาราง 5 พบว่า ค่าความขรุขระผิวมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลอง 2FI จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองทั้งหมดนั้น มีค่า $P < 0.0001$ [17, 19] สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยสัญลักษณ์ความเร็วรอบ A(1) และ A(2) เป็นความละเอียดของการวิเคราะห์สมการถดถอยที่ออกแบบการทดลองโดยไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) นอกจากนี้ การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมของการทดลอง พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และระยะป้อนลึก (C) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิว ยกเว้นปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิว สำหรับการกัดด้านข้างของ WPCs โดยใช้ End Mill ขนาด 12 และ 16 มม. ตามลำดับ



ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติ

Sources	Side Milling		Face Milling	
	End Mill 12	End Mill 16	End Mill 12	End Mill 16
Std. Dev.	0.669	0.0395	0.0849	0.1051
MEAN	2.90	3.01	4.09	5.23
R ²	0.9347 (93.47%)	0.9522 (95.22%)	0.9251 (92.51%)	0.9187 (91.87%)
Adj-R ²	0.9116 (91.16%)	0.9424 (94.24%)	0.9030 (90.30%)	0.8900 (89.00%)
Pred-R ²	0.8719 (87.19%)	0.9241 (92.41%)	0.8738 (87.38%)	0.8364 (83.64%)
C.V.%	3.57	4.31	3.19	4.01

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สมการถดถอยในแต่ละปัจจัยของการทดลอง ก่อนนำมาวิเคราะห์เพื่อเป็นประโยชน์ในการระบุผลกระทบสัมพัทธ์ของปัจจัยโดยการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วยรอบในการตัด (A) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) สรุปได้ว่า ความเร็วยรอบในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Coded Equation ได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการการถดถอยที่เหมาะสมของความขรุขระผิวสำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs

การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการการถดถอยที่เหมาะสมของความขรุขระผิวสำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs แสดงดังตารางที่ 5 โดยกำหนด รัศมีนัยสำคัญที่ 0.05 ($P < 0.05$) พบว่า ค่าความขรุขระผิวมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลอง 2FI กล่าวคือรูปแบบจำลองนั้นมีค่านัยสำคัญคือ $P < 0.0001$ [17, 19] สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักก็มีผล

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 12 mm)} = & 2.91 + 0.2296A(1) - \\ & 0.0126A(2) - 0.1437B(1) - 0.0148B(2) - \\ & 0.0870C(1) + 0.0096C(2) + 0.0185A(1)B(1) + \\ & 0.0107A(2)B(1) + 0.0552A(1)B(2) - \\ & 0.0615A(2)B(2) - 0.0648A(1)C(1) + \\ & 0.0007A(2)C(1) + 0.0152A(1)C(2) + \\ & 0.0196A(2)C(2) + 0.0474B(1)C(1) - \\ & 0.0370B(2)C(1) - 0.0281B(1)C(2) - \\ & 0.0004B(2)C(2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 16 mm)} = & 3.01 + 0.2378A(1) - \\ & 0.1992A(2) - 0.1022B(1) + 0.0244B(2) - \\ & 0.0778C(1) + 0.0089C(2) + 0.0450A(1)B(1) - \\ & 0.0317A(2)B(1) - 0.0013A(1)B(2) + \\ & 0.0250A(2)B(2) + 0.0106A(1)C(1) + \\ & 0.0239A(2)C(1) - 0.0128A(1)C(2) - \\ & 0.0011A(2)C(2) - 0.0011B(1)C(1) + \\ & 0.0006B(2)C(1) - 0.0094B(1)C(2) + \\ & 0.0039B(2)C(2) \end{aligned} \quad (2)$$



อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs [1, 17, 20] เช่นเดียวกันกับการกัดด้านหน้าของ WPCs นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ปัจจัยร่วมของการทดลอง พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) และปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อน (B) และระยะกินลึก (C) มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs ยกเว้น ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และระยะกินลึก (C) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิว สำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs โดยใช้ End Mill ขนาด 12 มม. เนื่องจาก End Mill ขนาด 12 มม. มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการกัด WPCs ดังนั้น เมื่อมีการปรับความเร็วรอบ (A) ให้มีความสัมพันธ์กับอัตราป้อน (B) ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) และปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และระยะป้อนลึก (C) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิวของทุกสภาวะการทดลองสำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs ยกเว้นปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อน (B) และระยะกินลึก (C) มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ต่อค่าความขรุขระผิว โดยใช้ End mill ขนาด 16 มม. นอกจากนี้ จากสมการถดถอยค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วรอบในการตัด (A) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) สรุปได้ว่า ความเร็วในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิว เช่นเดียวกับการกัดด้านข้างของ WCs แสดงดังสมการ (3) และ (4)

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 12 mm)} = & 4.09 + 0.2574A(1) + \\ & 0.0493A(2) - 0.1389B(1) + 0.0330B(2) - \\ & 0.0989C(1) + 0.0270C(2) - 0.0007A(1)B(1) + \\ & 0.0174A(2)B(1) + 0.0236A(1)B(2) - \\ & 0.0178A(2)B(2) + 0.0193A(1)C(1) - \\ & 0.0559A(2)C(1) - 0.0267A(1)C(2) + \\ & 0.0493A(2)C(2) + 0.0122B(1)C(1) - \\ & 0.0130B(2)C(1) - 0.0137B(1)C(2) + \\ & 0.0044B(2)C(2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 16 mm)} = & 5.23 + 0.3933A(1) - \\ & 0.2907A(2) - 0.1062B(1) + 0.0289B(2) - \\ & 0.1359C(1) + 0.0159C(2) + 0.0454A(1)B(1) + \\ & 0.0428A(2)B(1) + 0.0156A(1)B(2) - \\ & 0.0420A(2)B(2) - 0.1346A(1)C(1) + \\ & 0.0628A(2)C(1) + 0.0502A(1)C(2) - \\ & 0.0263A(2)C(2) - 0.0148B(1)C(1) - \\ & 0.0002B(2)C(1) - 0.0039B(1)C(2) + \\ & 0.0113B(2)C(2) \end{aligned} \quad (4)$$

3.5 ปัจจัยที่มีผลตอบสนองของค่าความขรุขระผิวและการหาค่าพื้นผิวตอบสนอง

ผลกระทบของปัจจัยหลัก ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) ที่มีผลต่อการตอบสนอง คือ ความขรุขระผิวของ WPCs แสดงดังรูปที่ 3 โดยยกตัวอย่างการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองของการกัดข้าง โดยใช้ End mill ขนาด 16 มม. จากการศึกษา พบว่า เมื่อความเร็วรอบของการกัดเพิ่มขึ้นจาก 220 เป็น 480 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจาก ความเร็วรอบในช่วงนี้ไม่ส่งผลต่อ



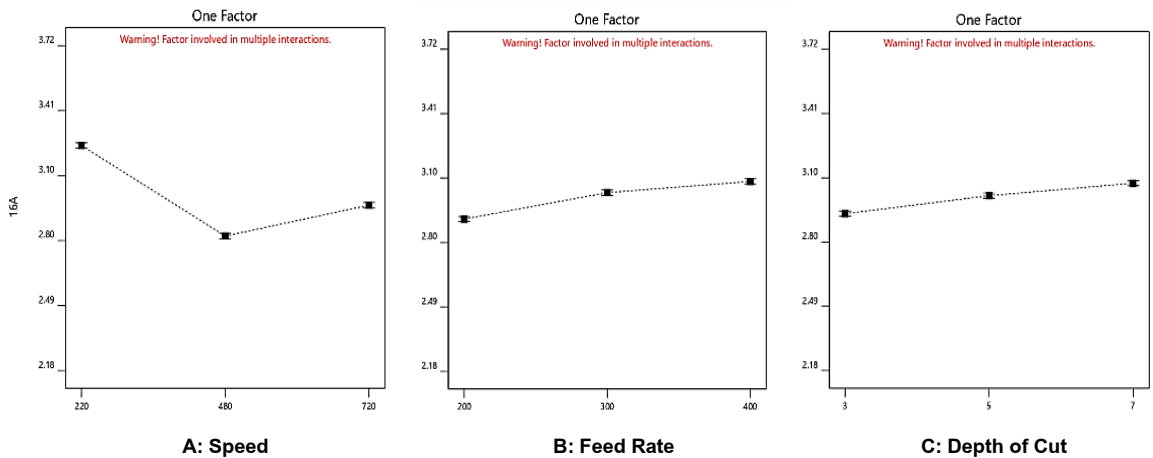
การหลอมเหลวของพลาสติกและเป็นช่วงความเร็วรอบที่เหมาะสม และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 480 เป็น 720 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเกิดจากความร้อนสะสมในชิ้นงานทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวบริเวณผิว ส่งผลให้เกิดความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 300 และ 400 มม./นาที ทำให้

ความเร็วของการเดินของชิ้นงานในการตัดเฉือนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจาก เศษของผิวงานที่กีดเกาะติดอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน ส่งผลให้เพิ่มความขรุขระของผิวชิ้นงาน และเมื่อระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 และ 7 มม. ทำให้อัตราการเอาน้ำออกเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [20]

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs

Sources	P-Value			
	Side Milling		Face Milling	
	End Mill 12 mm	End Mill 16 mm	End Mill 12 mm	End Mill 16 mm
Model	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*
A-Speed	< 0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
B-Feed	< 0.0001*	<0.0001*	< 0.0001*	0.0017*
C-depth	0.0002*	<0.0001*	0.0002*	0.0002*
AB	0.0107*	0.0074*	0.2348	0.0258*
AC	0.0209*	0.0465*	0.0482*	0.0057*
BC	0.0874	0.2012	0.7413	0.8015

หมายเหตุ: * ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

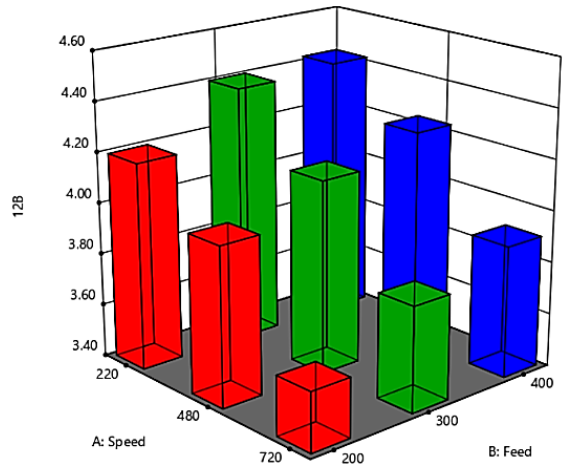
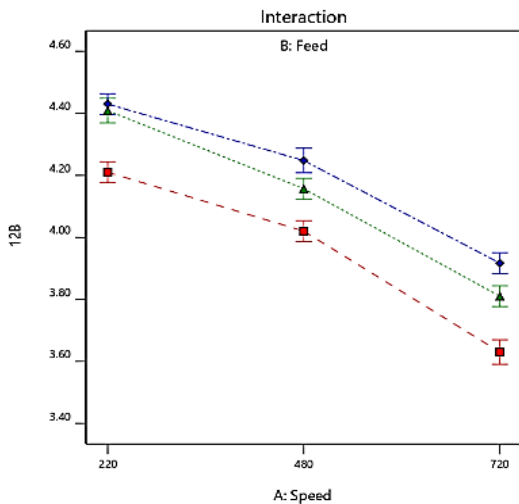


รูปที่ 3 ผลกระทบแต่ละปัจจัยต่อความขรุขระผิว



นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) ทำนายค่าความขรุขระผิว [10, 16] โดยยกตัวอย่างปัจจัยที่มีผลค่าความขรุขระผิวและพื้นผิวตอบสนองของการกัดด้านหน้า โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. แสดงดังในรูปที่ 4 - 6 ตามลำดับ กล่าวคือ จากรูปที่ 4 แสดงความเร็วรอบและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs จะเห็นได้ว่า ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและใช้อัตราป้อนลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และถ้าใช้ความเร็วรอบลดลงและอัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยสุด คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และอัตราป้อนที่ 200 มม./นาที จากรูปที่ 5 แสดงความเร็วรอบและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs จะเห็นได้ว่า ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและใช้ระยะ

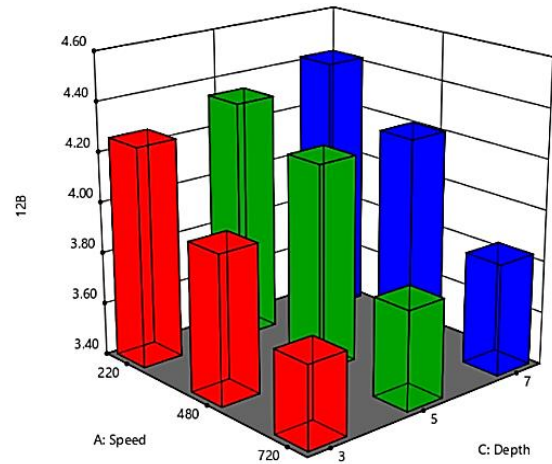
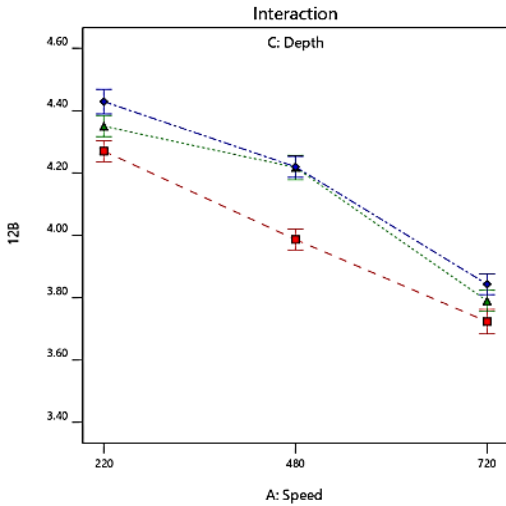
กินลึกลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และถ้าใช้ความเร็วรอบลดลงและระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยสุด คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. และจากรูปที่ 6 แสดงอัตราป้อนและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นและใช้ระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่ออัตราป้อนลดลงและใช้ระยะกินลึกลดลง จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลงตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยสุด คือ อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยร่วมดังกล่าวนำไปสู่การหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวของ WPCs



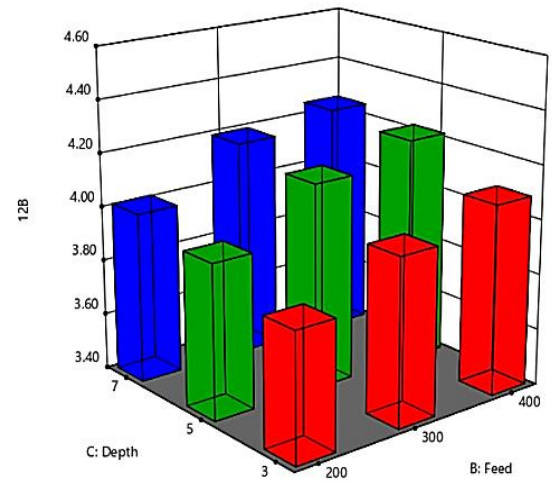
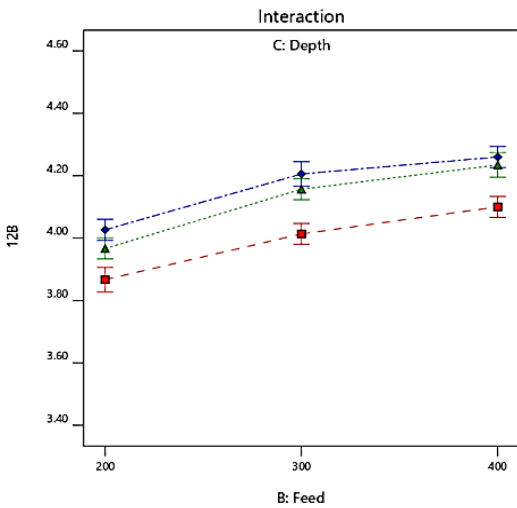
รูปที่ 4 อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของการกัดด้านหน้าโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม.



บทความวิจัย



รูปที่ 5 อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบและระยะกินลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของการกัดด้านหน้าโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม.



รูปที่ 6 อิทธิพลของปัจจัยอัตราป้อนและระยะกินลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของการกัดด้านหน้าโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม.



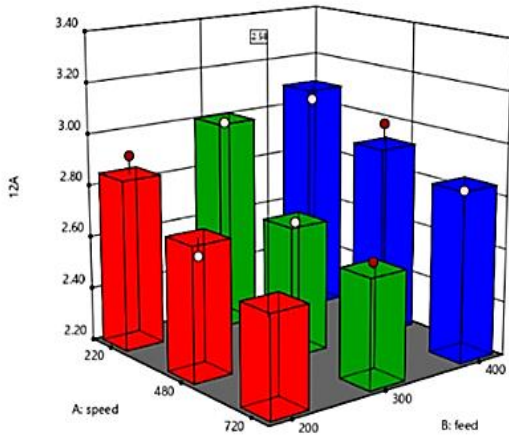
3.6 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้า

การวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดและการทำนายค่าความขรุขระผิวโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) [2, 5] เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์โดยเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวที่มีค่าน้อยที่สุด (Minimize) ของ WPCs แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ กล่าวคือ ประสิทธิภาพของผิวชิ้นงานที่ดีต้องมีค่าความขรุขระผิวที่น้อยที่สุดจากกระบวนการกัดของ WPCs โดยมีปัจจัยในการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert (Version 8) ได้สภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

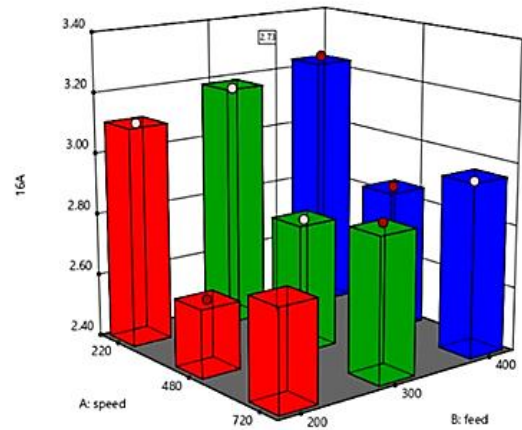
แสดงดังตารางที่ 6 โดยสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างของ WPCs โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 และ 2.730 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 87.86% และ 85.42% ตามลำดับ นอกจากนี้ สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านหน้าของ WPCs โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 3.280 และ 4.860 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 95.14 และ 95.83% ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง

END MILL	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Desirability (%)
Side Milling End Mill 12	720	200	3	2.580	87.86
Side Milling End Mill 16	720	200	3	2.730	85.42
Face Milling End Mill 12	720	200	3	3.280	95.14
Face Milling End Mill 16	720	200	3	4.860	95.83

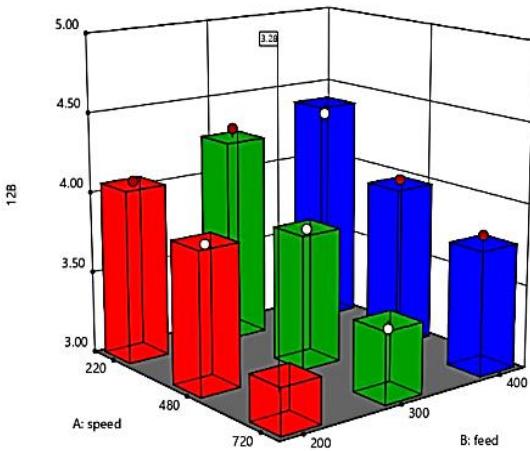


(ก)

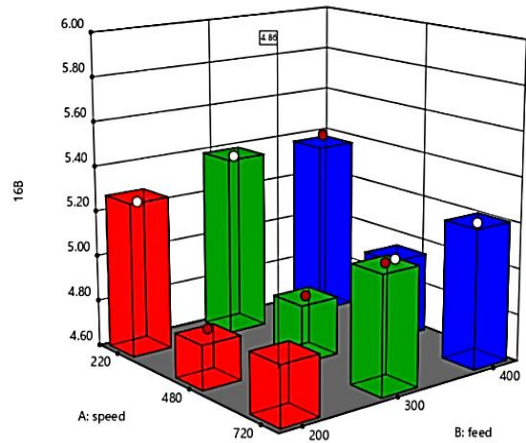


(ข)

รูปที่ 7 สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างของ WPCs: (ก) ใช้ดอก End mill ขนาด 12 มม. และ (ข) ใช้ดอก End mill ขนาด 16 มม.



(ก)



(ข)

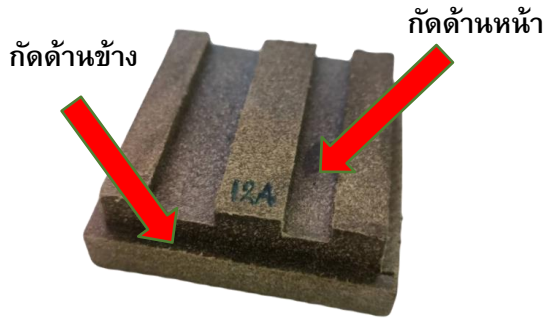
รูปที่ 8 สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านหน้าของ WPCs: (ก) ใช้ดอก End mill ขนาด 12 มม. และ (ข) ใช้ดอก End mill ขนาด 16 มม.



3.7 การตรวจสอบพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้า

การตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ในการกัดของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่เหมาะสมที่สุดต่อค่าความขรุขระผิวว่าตรงตามการวิเคราะห์ทางสถิติหรือไม่ โดยสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs ของทุกสภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม.

แสดงดังรูปที่ 9 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยการเปรียบเทียบค่าจากการทำนายและค่าจริงจากการทดลอง โดยทำการขึ้นรูปทำการกัด และทำการทดลองค่าความขรุขระผิวทั้งหมด 5 ซ้ำ พบว่า ค่าจากการทำนายมีค่าแตกต่างกันสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทดลองจริงควรไม่เกิน 5% ซึ่งหมายความว่า การทำนายค่าความขรุขระผิวมีความน่าเชื่อถือในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิว แสดงดังตารางดังตารางที่ 7



รูปที่ 9 การตรวจสอบพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้าของ WPCs

ตารางที่ 7 ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง

END MILL	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Observed (Ra)	Percentage Error (%)
Side Milling End Mill 12	720	200	3	2.580	2.622	1.63
Side Milling End Mill 16	720	200	3	2.730	2.864	4.91
Face Milling End Mill 12	720	200	3	3.280	3.184	2.93
Face Milling End Mill 16	720	200	3	4.860	4.681	3.68



4. สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ ไอ-ออปติมอล (I-Optimal Experimental Design) จากนั้น ทำการวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองและสมการถดถอยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทำการทำนายสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ผลการทดลอง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs ทุกสภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. สำหรับการกัดด้านข้าง โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. ได้ค่าการทำนายค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 และ 2.730 ไมโครเมตร ตามลำดับ และสำหรับการกัดด้านหน้า โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. ได้ค่าการทำนายค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 3.280 และ 4.860 ไมโครเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังมีการยืนยันผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted) และค่าจริง (Observed) ที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง 2 ค่า น้อยกว่า 5% สรุปได้ว่า กระบวนการออกแบบการทดลอง การขึ้นรูป การทดสอบ และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของงานวิจัยมีความแม่นยำและเชื่อถือได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 (รหัสขอเสนอการวิจัย: DR256508012004) และขอขอบคุณหลักสูตร วิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรี ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.M. Smith and M.P. Wolcott, Opportunities for wood/natural fiber-plastic composites (WPCs) in residential and industrial applications, *Forest Products Journal*, 2006, 56(3), 4-11.
- [2] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood-plastic composites with calcium carbonate filler, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2021, 23, 1503-1517.
- [3] S. Khamtree, T. Ratanawilai and S. Ratanawilai, The effect of alkaline-silane treatment of rubberwood flour for water absorption and mechanical properties of plastic composites, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, 2020, 33(5), 599-613.



- [4] C. Homkhiewa, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, Effects of ground rubber tire and natural rubber contents on mechanical properties of thermoplastic elastomer, *RMUTSV Research Journal*, 2021, 13, 553-567 (In Thai).
- [5] C. Homkhiew, T. Ratanawilai and W. Thongruang, The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design, *Composites Part B-Engineering*, 2014, 56, 350-357.
- [6] D. Akesson, T. Fuchs, M. Stoss, A. Root, E. Stanvall and M. Skrifvars, Recycling of wood fiber-reinforced HDPE by multiple reprocessing, *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(35), 43877.
- [7] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design, *KKU Research Journal*, 2014, 19, 780-793. (in Thai)
- [8] M.Y. Wang and H.Y. Chang, Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014-T6, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2004, 44(1), 51-57.
- [9] Z.H. Xu and Z.N. Kong, Mechanical and thermal properties of short-coir-fiberreinforced natural rubber/polyethylene composites, *Mechanics. Composite Materials*, 2014, 50(3), 353-358.
- [10] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, Response surface optimization and statistical analysis of composites made from calcium carbonate filler-added recycled polypropylene and rubberwood fiber, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, 2022, 35(3), 391-415.
- [11] E.O. Olakanmi, E.A. Ogunesan, E. Vunain, R.A. Lafia-Araga, M. Doyoyo and R. Meijboom, Mechanism of fiber/matrix bond and properties of wood polymer composites produced from alkaline-treated daniella oliveri wood flour, *Journal of Polymer Composites*, 2016, 37(9), 2657-2672.
- [12] C. Homkhiewa, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, Effects of ground rubber tire and natural rubber contents on mechanical properties of thermoplastic elastomer, *RMUTSV Research Journal*, 2021, 10, 553-567. (In Thai)



- [13] A. Zolfaghari, A.H. Behravesht and P. Shahi, Comparison of mechanical properties of wood–plastic composites reinforced with continuous and noncontinuous glass fibers, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, 2015, 28(6), 791-805.
- [14] H. Essabir, R. Boujmal, M.O. Bensalah, D. Rodrigue, R. Bouhfid, and A.E.K. Qaiss, Mechanical and thermal properties of hybrid composites: oil-palm fiber/clay reinforced high density polyethylene, *Mechanics of Materials*, 2016, 98, 36-43.
- [15] W. Cheewawuttipong, C. Homkhiew and S. Rawangwong, A comparative study on the effect of oil palm fiber contents and types on properties of rubberwood sawdust-polypropylene composites, *RMUTSV Research Journal*, 2022, 14(11), 31-46. (In Thai).
- [16] T. Ratanawilaila, P. Pitsuwan, S. Jirasampata and C. Homkhiew, Influence of milling factors on surface finish of wood-plastic composites, *Ladkrabang Engineering Journal*, 2015, 32(2), 43–48.
- [17] C. Srivabut, S. Rawangwong, C. Homkhiew, and J. Rodjananugoon, Optimal condition on surface roughness in side milling of high-density polyethylene and rubberwood flour composites using response surface methodology, *Ladkrabang Engineering Journal*, 2022, 39(1), 23-34.
- [18] T. Ratanawilailai, P. Lekanukit and S. Urapantamas, Effect of rubberwood and palm oil content on the properties of wood–polyvinyl chloride composites, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, 2014, 27(6), 719-730.
- [19] A. Ashori and S. Sheshmani, Hybrid composites made from recycled materials: Moisture absorption and thickness swelling behavior, *Bioresource Technology*, 2010, 101(2), 4717-4720.
- [20] C. Srivabut, T. Ratanawilailai, and S. Hiziroglie, Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber, *Construction and Building Materials*, 2018, 162, 450-458.
- [21] S. Tamrakar and R.A. Lopez-Anido, Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 2011, 25(10), 3977-3988.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง แบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความ ต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่เกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ(6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech

Authors Guideline and Manuscript Preparation

JIT is published tri-annually by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All considered articles have not been published elsewhere and are not currently submitted for consideration in other journals. All articles are independently assessed by specialist in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or no less than 2500 words using a word count command of MS Word (up to 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3 – 5 words).

The content of the research article consists of 5 - 6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's website: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech.



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index> ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.

**Manuscript Submission Form**

1. Title

2. Type of manuscript Research Article Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Name	Affiliation	Telephone	E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

 I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included:

 Manuscript submission by system online at <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech/index> Manuscript submission by e-mail: JIT.journal@gmail.com Manuscript submission by self or post-mail

I hereby certify that the information above is true and accurate.

Signature Corresponding author

()

Date Month Year



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 18 ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2565

- | | |
|---|--|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร เชื้อเพ็ง | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐา เลหากุลจิตต์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.กนกกาญจน์ จิรกุลสมโชค | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒน์สุข | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.อรรตพล แก้ววิลัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.จตุพร แก้วอ่อน | มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.นวดล เพ็ชรวัฒนา | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 14. รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเวทย์ อุทโท | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 15. รองศาสตราจารย์ โอบาส ศิริกรขิตถาวร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์เดช กীরดีพรานนท์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระภัทร จริยะนวิวิช | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รติพร มั่นพรหม | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานิดา ทองรุ่ง | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา มากมูล กราร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ ฐัณฑ์คุณ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ มีถม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราวัชต์พร นवलสวรรค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา มามาตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ประสงค์พันธ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ สระมูล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสรัจ พฤทธิโกมล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ |



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 18 ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2565

- | | |
|---|--|
| 29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรายุทธ คัมภีร์วัฒน์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ รัตตะออง | มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา |
| 32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิริเดช คูหาทองสัมฤทธิ์ | มหาวิทยาลัยรามคำแหง |
| 33. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีรานุช บุคดีจิ้น | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาริราช |
| 34. อาจารย์ ดร.รัชกุล เป็รื่องการ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 35. อาจารย์ ดร.ชญาณิชฐ์ วิทยาภิรมย์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 36. อาจารย์ ดร.สุนทร โอษะจุงาม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 37. อาจารย์ ดร.โสภิตา ท่วมมี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 38. อาจารย์ ดร.จิรวัดน์ วรวิชัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| 39. อาจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 40. อาจารย์ ดร. มณฑนา รังสิโยภาส | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 41. อาจารย์ ดร.กฤษฎา พรหมสุทธิรักษ์ | สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา |
| 42. อาจารย์ ดร.กรัณท์ กระแสสินธุ์ | สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) |

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๘ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๕

บทความ (Articles)

- Analysis and Testing of Muddy Soil from the Sediment Pond of The Mae Moh Mine for Portland Pozzolan Cement Production, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 1-14.
- Influences of Aging and Inflation Pressure on Stiffness and Absorbed Energy of a Passenger Car Radial Tire, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 15-28.
- Application of Quality Function Development Technique in Combination with Kansei Engineering in the Design and Development of Ceramic Tea Set Products, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 29-46.
- Centimeter Indoor Real-Time Location System, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 47-68.
- Increasing Yield and Reducing the Cost of Cultivation of Asparagus with the Internet of Things, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 69-88.
- A Comparison of Activity Time Estimates Methods in PERT, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 89-102.
- High-efficiency Wood Stove Development Based on CFD Analysis, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 103-118.
- Effects of Injection Timing Adjustment of Plastic Pyrolysis Oil Blended with and Diesel Fuel on Performance and Emissions of Diesel Engine, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 119-129.
- Reducing the Complexity of the Skew Angle Detector and Corrector for Bit-Patterned Magnetic Recording, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 130-145.
- Monitoring of Surface Water Quality at Ubon Ratchathani University, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 146-160.
- Application of Kansei Engineering Technique and Kano Model for Design and Development of Lamp Products from Krajoed Basketry, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 161-178.
- The System Analysis and Build Prototype of Flat-plate Solar Collector by 3-D Finite Element Method, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 179-194.
- Influences of Carboxymethyl Cellulose Bio-based Coating on Paper Properties, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 195-207.
- Application of a Long Short - Term Memory Deep Natural Network Model for Field Crops Price Forecasting in Thailand, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 208-227.
- Effect of Active Packaging on the Quality of Processed-Catfish (*Clarias*) Products, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 228-243.
- Survey of Safety Standards at Railway Intersections: A Case Study of Railway Intersections in Chachoengsao Province, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 244-259.
- Effect of Factors and Optimal Condition in Milling Process of Composites Using I-Optimal Experimental Design, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 260-279.

จัดพิมพ์โดย: หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาชื่น 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร. +66 2 555-2000 ต่อ 6615 Email JIT.journal@gmail.com